



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

CFD 해석을 기반으로 한 CUPID 부수로 단위
해석 모듈의 지지격자-유도 횡류 모델 개선

**Improvement of Grid-directed Cross Flow in
CUPID Subchannel Scale Analysis Module
based on CFD Calculation**

2019년 8월

서울대학교 대학원
에너지시스템공학부
이 재 호

**CFD 해석을 기반으로 한 CUPID 부수로 단위
해석 모듈의 지지격자-유도 횡류 모델 개선**

**Improvement of Grid-directed Cross Flow
in CUPID Subchannel Scale Analysis Module
based on CFD Calculation**

지도교수 조 형 규

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2019 년 8 월

서울대학교 대학원
에너지시스템공학부
이 재 호

이재호의 석사 학위논문을 인준함

2019 년 8 월

위 원 장	<u>김 응 수</u>	(인)
부위원장	<u>조 형 규</u>	(인)
위 원	<u>이 재 룡</u>	(인)

초 록

지지격자 혼합날개는 핵연료봉의 냉각성 증대를 위한 구조물로, 부수로 간 유동 교환을 증진시키는 목적으로 설치되었다. 지지격자 혼합날개로 인해 복잡한 구조의 유동이 발생할 수 있으며, 이로 인해 유동 혼합과 난류 특성이 변화할 수 있다. 이에 혼합날개에 의한 유동 혼합을 보다 정확히 예측하기 위해 전산 유체 해석 코드를 이용해 지지격자 혼합날개에 의한 횡방향 유동을 모사하기 위한 연구가 활발히 진행 중이다. 한편, 노심 설계 및 노심 열적 여유도 평가에 활용되는 부수로 단위 해석 코드는 지지격자에 의한 유동 혼합을 모사하기 위해 지지격자-유도 횡류 모델을 도입하고 있다. 한국원자력연구원에서 개발 중인 다차원 열수력 해석 코드 CUPID 또한 부수로 단위 해석을 위해 지지격자-유도 횡류 모델을 적용하여 노심 모사에 활용 중에 있다.

기존의 CUPID 코드에 적용된 지지격자-유도 횡류 모델의 경우 각 부수로에서 혼합날개의 효과를 나타내는 횡방향 대류 인자의 값을 특정 상수로 사용하였다. 이는 실험에서 관측된 결과를 적절히 예측하기 위해 선택된 값으로 해당 값에 대한 물리적 근거가 부족하였다. 또한 원자로 노심 부수로 별 다양한 형상과 혼합날개 방향을 갖고 있음에도, 동일한 상수를 전체 부수로에 적용하는 것이 타당한지에 대한 검증이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 혼합날개에 의해 생성되는 부수로 내부 유동 측정 실험인 MATIS-H에 대한 CFD 해석을 수행하였다. CFD 해석 결과와 실험결과 간의 상호 비교를 통해 CFD 해석의 난류 모델 및

격자가 적절함을 평가하였다. 이후 CFD 결과를 부수로 단위로 평균하여 각 부수로 별 횡방향 대류 인자를 도출하였으며, 그 결과 부수로 종류 별로 횡방향 대류 인자의 값이 다르다는 점을 확인하였다. CE형 핵연료 집합체의 안내관 부근의 부수로 또한 그 형상 차이를 고려하여 횡방향 대류 인자를 CFD 계산을 통해 도출하였다.

수정된 횡방향 대류 인자를 CUPID 코드에 적용하여 PSBT 열 혼합 실험 검증을 진행하였다. 기존 모델과 같이 균일한 횡방향 대류 인자를 적용했을 때보다 수정된 횡방향 대류 인자를 적용했을 때 PSBT 열 혼합 실험 출구 온도 분포를 더 잘 예측하였고, 특히 온도가 가장 높은 부수로의 위치를 예측할 수 있음을 확인하였다.

이후, APR1400 전노심 해석을 위해 수정된 횡방향 대류 인자를 적용하여 수정 전 계산과의 비교를 진행하였다. 중성자 수송 해석 코드인 nTRACER 계산의 출력 분포를 이용하여 해석을 수행하였으며, 전노심 계산에서 최소 DNBR을 비교한 결과 수정된 횡방향 대류 인자를 적용한 계산에서 최소값이 0.5% 가량 감소하였다. 이러한 차이가 발생하는 이유를 횡방향 유동 분포를 통해 설명하였다.

마지막으로, 지지격자-유도 횡류 모델을 2상유동 계산으로 확장 적용하였다. 2상유동 계산에서의 모델 적합성을 검증하기 위하여 PSBT 기포율 측정 실험에 대한 해석을 수행하였다. 지지격자-유도 횡류 모델은 단상 액체 유동 양식과 기포 유동 양식이 나타나는 부수로에 대하여 적용하였다. 지지격자-유도 횡류 모델을 적용하면 혼합날개 모델을 적용하지 않은 계산과 비교하여 기포율이 감소하고, 비등이 더 늦게 시작되는 특

정이 있었고, 이로 인해 실험 결과 예측 정확도가 상대적으로 상승하였다. 그러나, 높은 기포율 조건의 실험에서는 실험보다 비등의 시작 위치를 과도하게 낮게 예측하였다. 이를 해결하기 위해서는 높은 기포율이 나타나는 부수로에서도 혼합날개 모델을 적용해야 하며, 혼합날개에 의한 기포 거동을 모사할 수 있는 실험 데이터와 관련 모델이 제시되어야 한다.

주요어: 부수로 스케일 열수력 해석, 혼합 날개, 지지격자-유도 횡류 모델, CUPID, CFD 해석

학번: 2017-20682

목 차

초	록.....	i
목	차.....	iv
표	목 차.....	vi
그	림 목 차.....	vii
제 1 장 서	론.....	1
제 1 절 연구 배경.....		1
1. 지지격자-유도 횡류 모델.....		3
2. CUPID 코드의 지지격자-유도 횡류 모델 적용.....		4
제 2 절 연구 목적 및 범위.....		6
제 2 장 지지격자 모델의 CFD 연구.....		9
제 1 절 MATiS-H 실험.....		9
1. CFD 해석 영역 정의.....		10
2. 난류 모델에 따른 민감도 분석.....		14
3. CFD 해석을 이용한 유선 분석.....		19
제 2 절 횡방향 대류 인자 계산.....		23
1. MATiS-H 형상에서의 횡방향 대류 인자 계산.....		24
2. 안내관 근처 형상에서의 횡방향 대류 인자 계산.....		28
3. 횡방향 대류 인자에 관한 고찰.....		32
제 3 장 지지격자-유도 횡류 모델의 개선.....		35
제 1 절 PSBT 열 혼합 실험.....		35

1. PSBT 열 혼합 실험 검증 결과	38
제 2 절 APR1400 전노심 해석	44
1. APR1400 단일 집합체 계산	44
2. APR1400 전노심 계산 결과 비교	49
 제 4 장 이상 유동 해석에서의 모델 적용	54
제 1 절 PSBT 기포율 측정 실험	54
1. PSBT 기포율 측정 실험 케이스	56
2. PSBT 기포율 측정 실험 검증 결과	58
 제 5 장 결 론	62
 참 고 문 헌	64
Abstract	66

표 목 차

표 2.1 난류 모델에 따른 실험 결과와의 유사도 분석	18
표 2.2 각 부수로 별 횡방향 대류 인자	31
표 2.3 각 부수로 별 횡방향 대류 인자 및 요인 비교	33
표 3.1 PSBT 열 혼합 실험 초기조건.....	36
표 3.2 PSBT 열 혼합 실험 검증 결과 비교	43
표 3.3 CE-1 상관식 상수	50
표 3.4 횡방향 대류 인자에 따른 전노심 해석 결과 비교.....	51
표 4.1 PSBT 실험 시리즈별 비교.....	56

그 립 목 차

그림 1.1 혼합날개 모델 적용 후 CUPID(좌)와 CTF(우) 코드의 단일 집합체 계산 결과 비교 (김슬빈, 2018).....	2
그림 1.2 CTF의 엇갈림 격자와 CUPID의 비엇갈림 격자	5
그림 1.3 PSBT 실험장치의 혼합날개에 의한 횡방향 유동	5
그림 1.4 PSBT 실험장치의 높이에 따른 횡방향 대류 인자 계산 (Blyth, 2017)	8
그림 1.5 일반적인 봉다발 구조에서의 부수로 (좌)와 안내관 근처 부수로 (우).....	8
그림 2.1 MATiS-H 시험장치 개략도 (Lee, 2014)	11
그림 2.2 분할 형태(좌)와 선회 형태(우) 혼합 날개 (Lee, 2014).....	11
그림 2.3 LDA 측정부 (Lee, 2014)	11
그림 2.4 CFD 해석 영역.....	12
그림 2.5 연료봉, 버튼, 지지격자의 실제 형상 (가)과 CFD 코드에서 묘사한 형상(나).....	12
그림 2.6 생성된 격자와 혼합날개, 연료봉 부근 프리즘 층.....	13
그림 2.7 $y=0.5P$ 에서 실험 결과와 해석결과 비교.....	15
그림 2.8 $y=1.5P$ 에서 실험 결과와 해석결과 비교.....	16
그림 2.9 $y=2.455P$ 에서 실험 결과와 해석결과 비교.....	17
그림 2.10 각 유선의 시작 위치 (가)와 유도되는 횡류의 방향 (나).....	21
그림 2.11 혼합날개 최상단으로부터 50 mm (좌상단), 70 mm (우상단),.....	21
그림 2.12 초기 속도에 따른 높이 별 유선들의 인접한 부수로로 이동한 비율 비교.....	22
그림 2.13 1, 2, 8번 부수로에서 높이에 따른 횡방향 대류 인자	26
그림 2.14 대칭 평면 조건에서 1, 2, 8번 부수로에서 높이에 따른 횡방향 대류 인자.....	27
그림 2.15 CE형 안내관 1/4 구조가 삽입된 집합체 형상	29

그림 2.16 25, 26번 부수로에서 높이에 따른 횡방향 대류 인자.....	30
그림 2.17 각 부수로 내부에 포함된 혼합날개의 개수 비교.....	34
그림 3.1 PSBT 실험장치 (Rubin, 2012)	37
그림 3.2 PSBT 열 혼합 실험 출력 분포.....	37
그림 3.3 PSBT 열 혼합 실험 결과의 출구 온도 분포.....	40
그림 3.4 CUPID 코드의 열 혼합 실험 해석 결과.....	40
그림 3.5 PSBT 열 혼합 실험의 횡방향 유동 방향 예측 개념도.....	41
그림 3.6 균일한 횡방향 대류 인자 (가)를 적용했을 때와 수정된 횡방향 대류 인자 (나)를 적용했을 때의 CUPID 계산 결과의 유선 분포....	41
그림 3.7 PSBT 실험장치의 가장자리 부근 횡방향 유동.....	42
그림 3.8 PSBT 열 혼합 실험의 CTF 코드 (가)와 ATHAS 코드 (나) (S. Dong, 2018) 계산 결과.....	42
그림 3.9 nTRACER 계산의 APR1400 8번 집합체의 출력 분포	46
그림 3.10 APR1400 8번 집합체 출구 온도 분포의 CUPID 해석 결과.....	47
그림 3.11 중앙 수직선 상에서 횡방향 대류 인자에 따른 온도 분포 비 교	48
그림 3.12 APR1400 중앙 안내관 부근의 혼합날개에 의한 횡방향 유동	48
그림 3.13 APR1400 전노심 해석 결과.....	52
그림 3.14 APR1400 23번 집합체 위치.....	52
그림 3.15 APR1400 23번 집합체의 DNBR 계산 결과.....	53
그림 4.1 PSBT 기포율 측정 실험장치의 측정부 (Rubin, 2012).....	55
그림 4.2 PSBT 실험 코사인 축방향 출력 분포	57
그림 4.3 PSBT 실험 5, 6번 시리즈의 가열봉 별 출력 분포 (가)와 7번 시 리즈의 가열봉 별 출력 분포 (나).....	57
그림 4.4 PSBT 05-6321번 실험의 혼합날개 모델을 적용하지 않은 계산 (가)과 혼합날개 모델을 적용한 계산 (나)의 출구 기포율 분포	60
그림 4.5 PSBT 05-6321번 실험의 혼합날개 모델을 적용하지 않은 계산	

(가)과 혼합날개 모델을 적용한 계산 (나)의 축방향 시점 기포율 분포	60
그림 4.6 혼합날개 모델을 적용하지 않은 CUPID 코드 계산의 PSBT 기포율 측정 실험 검증 결과	61
그림 4.7 혼합날개 모델을 적용한 CUPID 코드 계산의 PSBT 기포율 측정 실험 검증 결과.....	61

제 1 장 서 론

제 1 절 연구 배경

지지격자가 부착된 봉다발 구조를 지나는 난류 유동에 대한 연구는 열수력 연구 분야에서 제시된 오랜 연구 주제 중 하나이다. 지지격자는 봉다발을 고정시키고 연료봉의 진동을 예방하는 구조물로, 최근에는 벽면 열전달 성능 향상을 통한 핵연료봉의 냉각성 증대를 위한 지지격자 및 혼합날개(mixing vane)에 대한 연구가 활발하게 진행 중이다. 이에 따라 전산 해석 분야에서도 혼합날개에 의한 난류 유동 모사를 위한 연구의 필요성이 증대하였고, 부수로 단위 해석 분야에서도 지지격자 및 혼합날개에 의한 효과를 모사하는 모델이 개발되고 있다.

CUPID (Component Unstructured Program for Interfacial Dynamics) 코드는 다차원 2상유동 해석을 목적으로 KAERI (Korea Atomic Energy Research Institute, 한국원자력연구원)에서 개발 중인 코드로, 선행연구에서는 CUPID의 부수로 단위 해석에서 혼합날개 모델을 적용하는 연구를 진행하였다 (김슬빈, 2018). 해당 연구에서는 부수로 단위 해석에서 혼합날개에 의한 횡방향 운동량 전달을 모사하는 모델인 지지격자-유도 횡류 모델 (Grid-directed cross flow model)을 CUPID 코드에 적용하였으며, 상용 부수로 단위 해석 코드인 CTF 코드와의 코드간 비교가 진행되었다.

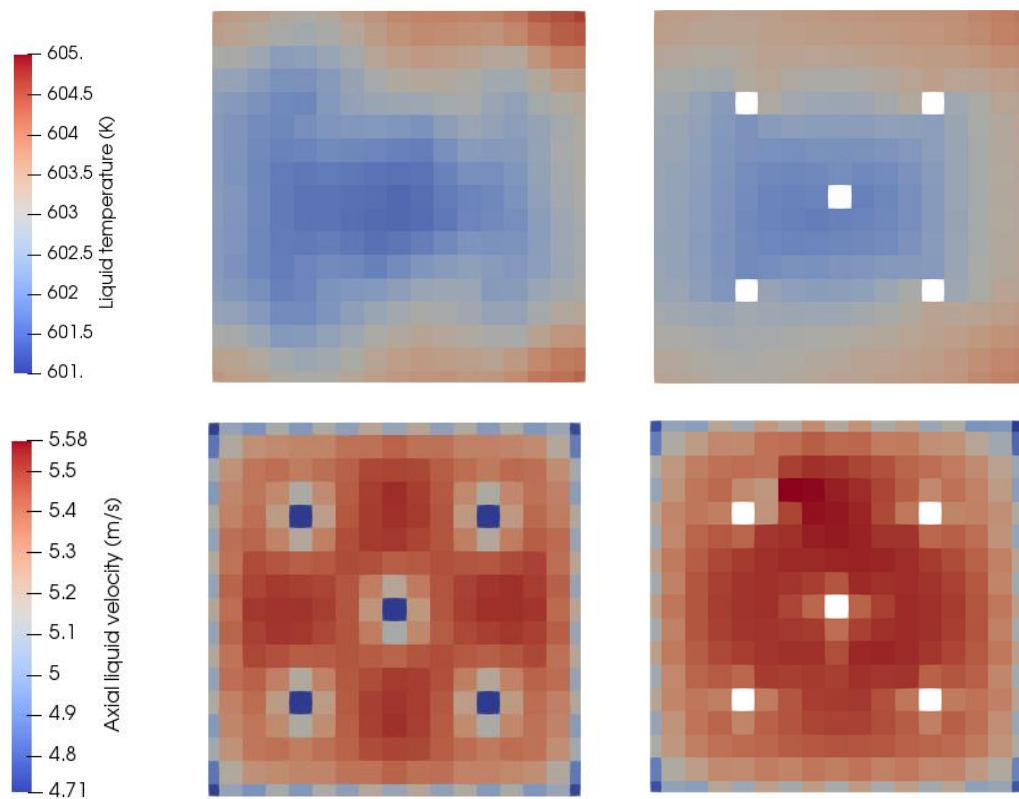


그림 1.1 혼합날개 모델 적용 후 CUPID(좌)와 CTF(우) 코드의 단일
집합체 계산 결과 비교 (김슬빈, 2018)

1. 지지격자-유도 횡류 모델

지지격자-유도 횡류 모델은 CTF 코드에서 사용되고 있는 혼합날개 모델이다. CTF 코드는 PNL (Pacific Northwest Laboratory)에서 개발된 COBRA-TF (Coolant-Boiling in Rod Arrays-Two Fluid) 코드를 PSU (Pennsylvania State University)에서 개선시킨 부수로 단위 해석 코드이다 (Salko, 2015). CTF에서 해당 모델은 혼합날개에 의해 추가되는 횡방향 액체 운동량 생성 항을 식 1과 같이 정의하였다 (Blyth, 2017).

$$\vec{M}_l^{GDCF} = f_{lat,SG}^2 u_l \rho_l A_{gap} S \quad (1)$$

여기서, \vec{M}_l^{GDCF} : 지지격자-유도 횡류에 의한 액체 운동량 생성 항

$f_{lat,SG}$: 횡방향 대류 인자,

u_l : 액체의 축방향 속도,

ρ_l : 액체 밀도,

A_{gap} : 부수로 간극의 수직방향 면적,

S : 각 부수로 간극에서 횡류의 방향을 정의하는 인자로, -1, 0, 1 중 하나의 값을 가짐.

횡방향 대류 인자는 CFD (Computational Fluid Dynamics) 해석을 통하여 계산한 뒤 부수로 코드에 반영하는 인자로, 식 2와 같이 정의된다.

$$f_{lat,SG}(z) = \frac{V_z^{CFD}}{U_{inlet}^{CFD}} \quad (2)$$

여기서, U_{inlet}^{CFD} : CFD 해석 시 해당 부수로 위치에서의 입구 축방향 속도,
 V_z^{CFD} : CFD 해석 시 해당 축방향 위치에서의 횡방향 속도

횡방향 속도의 크기는 혼합날개와 떨어진 축방향 거리에 영향을 받으므로 횡방향 대류 인자 또한 축방향 위치에 따라 값이 다르다. 따라서 해당 부수로의 축방향 좌표 위치에 해당하는 횡방향 대류 인자를 구해 부수로 코드에 반영해야 한다.

CTF 코드의 지지격자-유도 횡류 모델의 경우, 축방향 거리에 따른 횡방향 대류 인자와 각 부수로 간극에서의 횡방향 유동의 방향을 의미하는 식 (1)의 S를 별도의 파일에 입력하도록 되어 있다 (Avramova, 2016).

2. CUPID 코드의 지지격자-유도 횡류 모델 적용

그림 1.2와 같이 CTF 코드의 경우 스칼라 격자와 운동량 격자의 위치가 서로 엇갈려 있는 엇갈림 격자 (staggered grid)를 사용한다. 반면 CUPID 코드의 경우 모든 격자가 동일한 위치에 정의되는 비엇갈림 격자 (collocated grid)를 사용한다. 그림 1.3은 5x5 봉다발로 이루어진 PSBT (NUPEC PWR Subchannel and Bundle Tests) 실험장치에서 각 간극에 작용하는 혼합날개에 의한 횡방향 유동의 방향을 나타낸 그림이다. 엇갈림 격자에서는 운동량이 간극을 중심으로 정의되기 때문에 지지격자-유도 횡류 모델에 의한 생성 항도 각 간극에서 정의되는 데 반해 비엇갈림 격자계에서는 운동량이 부수로 중심에서 정의가 된다. 따라서 그림 1.3

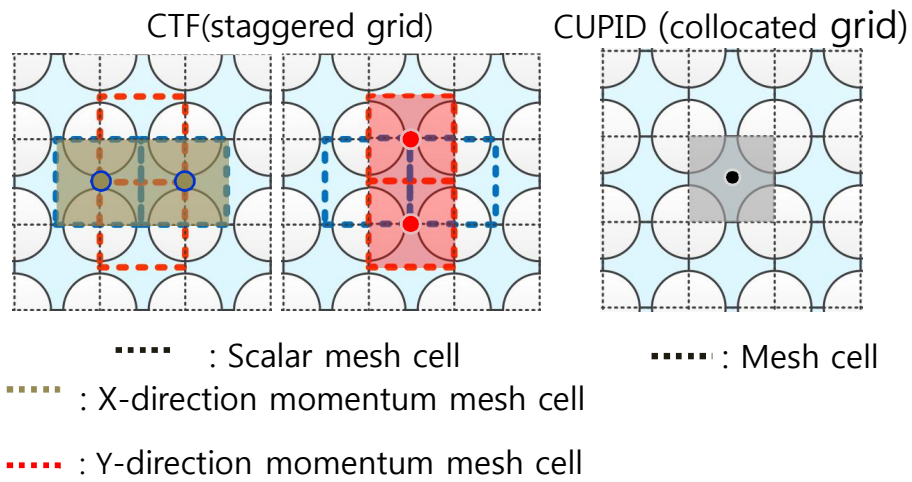


그림 1.2 CTF 의 엇갈림 격자와 CUPID 의 비엇갈림 격자

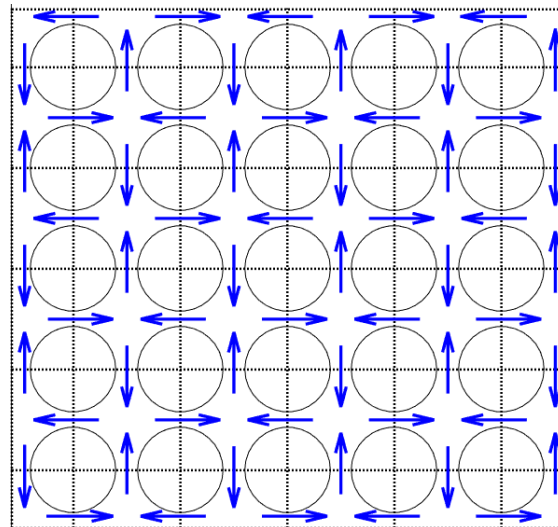


그림 1.3 PSBT 실험장치의 혼합날개에 의한 횡방향 유동

과 같은 일반적인 분리형 혼합날개 구조에서는 중앙 쪽에 위치한 부수로에서 지지격자-유도 횡류 모델에 의한 운동량 항이 상쇄되게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 선행연구에서는 식 (3), (4)와 같이 연속방정식과 에너지 보존 방정식에서도 지지격자-유도 횡류 모델을 적용하였다 (김슬빈, 2018).

$$M_e = f_{lat,SG} u_l \rho_l A_{gap} \quad (3)$$

$$M_h = f_{lat,SG} u_l \rho_l A_{gap} h_l \quad (4)$$

여기서, M_e : 지지격자-유도 횡류에 의한 액체 질량 생성 항,

M_h : 지지격자-유도 횡류에 의한 액체 에너지 생성 항,

h_l : 액체 엔탈피

제 2 절 연구 목적 및 범위

본 연구에서는 CUPID 코드에 적용된 지지격자-유도 횡류 모델을 보완하기 위해 두가지 측면에서 접근하였다.

첫째로, 횡방향 대류 인자의 값에 대한 물리적 근거가 부족함을 보완하고자 하였다. 해당 인자에 대한 선행 연구인 Blyth의 연구 (Blyth, 2017)에서는 PSBT 실험의 횡방향 대류 인자를 CFD 코드를 이용하여 계산했으며, 그 결과를 그림 1.4에 나타냈었다. 해당 인자의 최댓값은 약 0.27로 계산되었고, 김슬빈 (2018)의 연구에서는 이 값을 전체 부수로에 동일하게 적용하여 부수로 해석을 진행한 바 있다. 이와 같은

CFD 해석 결과를 이용해 부수로 단위 해석 코드의 횡방향 대류 인자를 도출하는 방법론 사용 시, CFD 해석의 적절성에 대한 엄밀한 검증이 요구된다. 이에 CFD 해석의 검증이 가능한 실험에 대한 해석을 수행하고 그 결과로부터 횡방향 대류 인자를 도출하고자 했다.

둘째로, 부수로의 종류 별로 횡방향 대류 인자의 값에 차이점이 있는지 확인하고자 한다. 기존의 지지격자-유도 횡류 모델에서는 동일한 높이의 모든 부수로에 대하여 같은 값의 횡방향 대류 인자를 정의하도록 되어 있다. 간극 별로 횡방향 대류 인자가 정의되는 CTF와 달리 CUPID는 비엇갈림 격자를 사용하기 때문에 부수로 단위로 횡방향 대류 인자를 정의해야 하고, 부수로의 경우 종류에 따라 수력직경, 공극률 등에 명확한 차이를 보이므로 횡방향 대류 인자도 부수로 종류별로 구분하여 정의해야 한다는 가능성이 존재한다. 따라서 이를 확인하기 위하여 CFD 계산을 통해 부수로의 종류 별로 횡방향 대류 인자를 계산해보고자 한다.

따라서 본 연구에서는 CUPID 부수로 단위 해석 성능 향상을 위하여 기존에 적용되어 있는 지지격자-유도 횡류 모델에서 사용되는 횡방향 대류 인자를 계산하고, 계산한 값을 코드에 반영하여 검증을 진행하였다. 또한 이상 유동 해석에서 지지격자-유도 횡류 모델의 타당성을 검증하기 위하여 이상 유동 실험 검증을 진행하였다. 부수로의 종류는 그림 1.5와 같이 일반적인 가장자리, 모서리, 중앙에 위치한 부수로 (1,2,8번) 외에도 CE형 원자로의 안내관과 인접한 부수로 (25,26번)에서도 횡방향 대류 인자를 계산하였다.

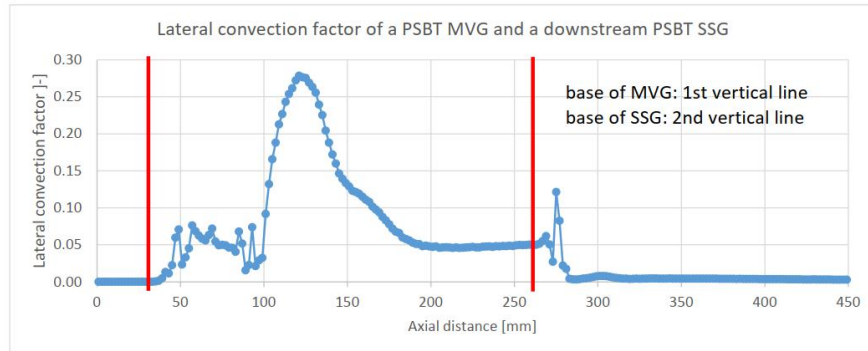


그림 1.4 PSBT 실험장치의 높이에 따른 횡방향 대류 인자 계산 (Blyth, 2017)

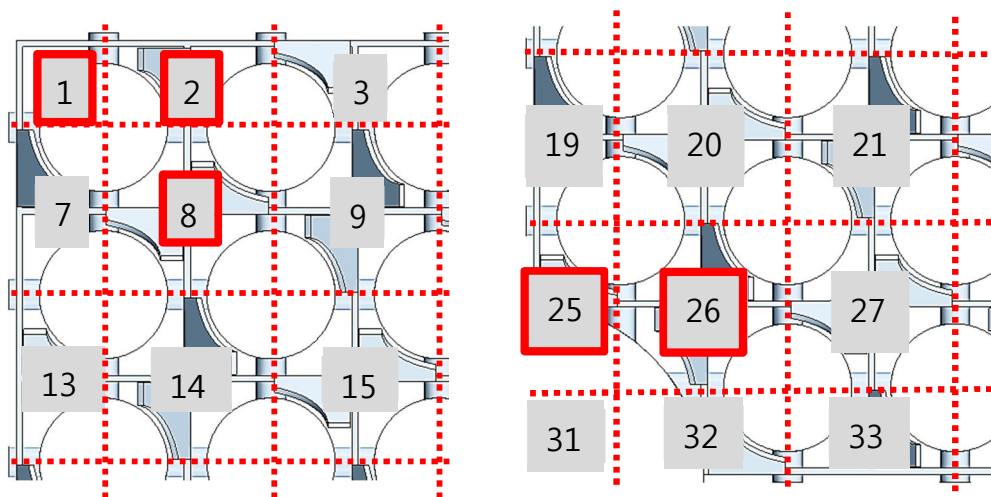


그림 1.5 일반적인 봉다발 구조에서의 부수로 (좌)와 안내관 근처 부수로 (우)

제 2 장 지지격자 모델의 CFD 연구

제 1 절 MATiS-H 실험

MATiS-H (Measurement and Analysis of Turbulent Mixing in Subchannels-Horizontal) 실험은 한국원자력연구원 (KAERI)에서 진행된 실험으로, 시험장치의 개략도는 그림 2.1과 같다 (Lee, 2014). MATiS-H 실험은 지지격자와 혼합날개가 부착된 봉다발을 지나는 난류 유동에 대해 CFD 해석능력을 검증하는 실험적 데이터를 제공하기 위한 목적으로 설계됐으며, 횡방향 속도 분포가 실험 데이터로 제공되어 있다. 이에 횡방향 대류인자를 계산하는 데에 적합하다고 판단되어 본 연구의 CFD 검증 실험으로 선정하였다.

시험부는 5x5 봉다발 구조로 이루어져 있으며, 혼합날개가 부착된 지지격자가 가상연료봉을 고정한다. 혼합날개는 그림 2.2와 같이 분할 형태와 선회 형태가 있으며, 본 연구에서는 분할 형태의 혼합날개를 다룬다. 분할 형태 혼합날개의 경우 높이 19 mm, 너비 15.2 mm이며 축방향 기준으로 약 30도 기울어져 있다. 시험부의 수력직경(D_h)은 24.27 mm, 연료봉간 간격(P)은 33.12 mm이며, 연료봉의 길이는 3,863 mm, 지름은 25.4 mm이다. 연료봉의 경우 측정 해상도 향상을 위하여 실제 가압 경수로에 쓰이는 연료봉보다 지름이 크게 설계되었다.

실험은 일정한 온도와 압력 조건에서 진행되었다. 온도는 섭씨 35도, 압력은 156.9kPa이다. 유량은 24.2kg/s, 입구 속도는 1.5m/s이다. 유동의

속도 분포 측정에는 LDA (Laser Doppler Anemometry)가 이용되었으며, 측정부는 그림 2.3과 같다. 혼합날개 최상단에서 $0.5D_h$, $1.0D_h$, $4.0D_h$, $10.0D_h$ 만큼 떨어진 높이에서 측정이 진행되었으며, 각각의 높이에서 1/4 단면의 수평, 수직방향 속도 분포가 측정되었다.

1. CFD 해석 영역 정의

실험장치 해석을 위해 상용 전산유체해석코드인 STAR-CCM+를 사용하였다. CFD 해석 영역은 그림 2.4와 같이 지지격자를 포함한 620 mm 구간에 대해서만 설정되었다. 입구에서는 속도 경계조건이 설정되었으며, 그림 2.4에 붉은색으로 표시된 입구에서 지지격자 하단까지의 100 mm 영역에서 주기 벽면 조건을 설정하여 완전 발달 유동을 모사하였다. 실험 장치에는 그림 2.5 (가)와 같이 지지격자 벽면에 부착된 버튼이 연료봉을 고정시키는 데 이용되는데, 이때 지지격자와 연료봉 사이에는 미세한 간극이 존재하게 된다. 이 간극을 해석 영역으로 포함시킴에 따라 격자 생성에 소요되는 비용 증가를 방지하기 위하여, 본 연구에서는 버튼들을 길이 방향으로 연장시켜 그림 2.5 (나)와 같이 간극을 배제하고 격자를 생성하였다.

격자 생성 결과는 그림 2.6과 같다. 격자는 다면체 격자(polyhedral cell mesher)를 사용하였으며, 연료봉과 혼합날개 부근에 6개의 프리즘 층(prism layer)을 생성하였다. 격자는 약 15,060,000개를 사용하였다. 벽면 y^+ 는 레이놀즈 응력 난류 (Reynolds stress turbulence) 모델에서 최댓값 8.0, 평균값 2.8이다.

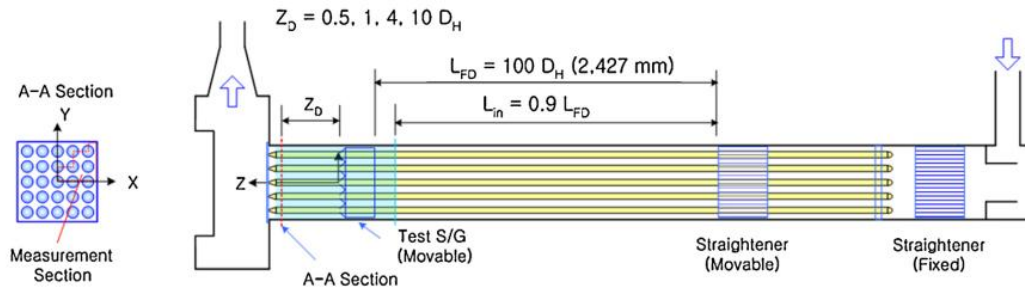


그림 2.1 MATiS-H 시험장치 개략도 (Lee, 2014)

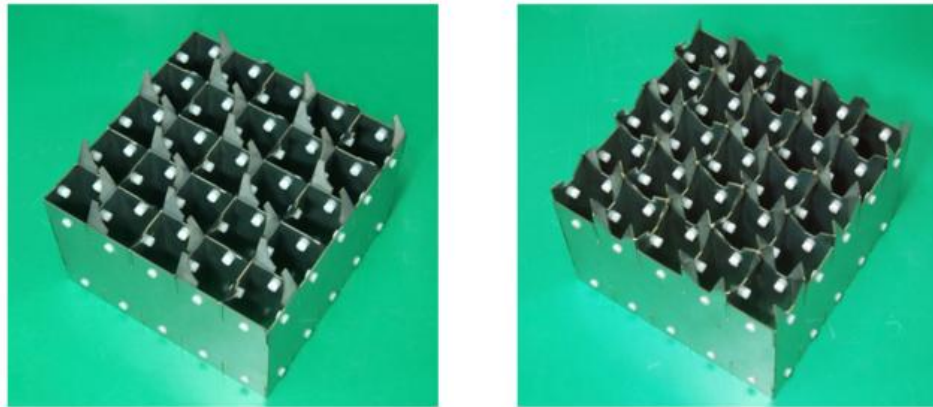


그림 2.2 분할 형태(좌)와 선회 형태(우) 혼합 날개 (Lee, 2014)

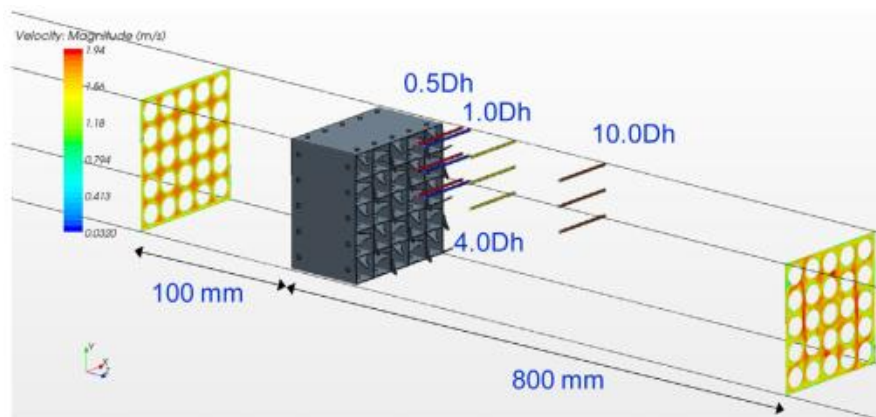


그림 2.3 LDA 측정부 (Lee, 2014)

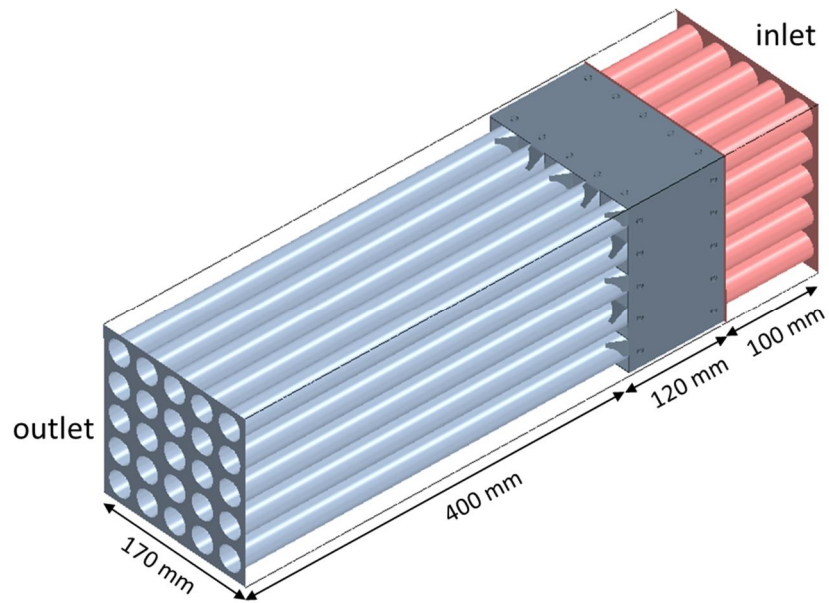
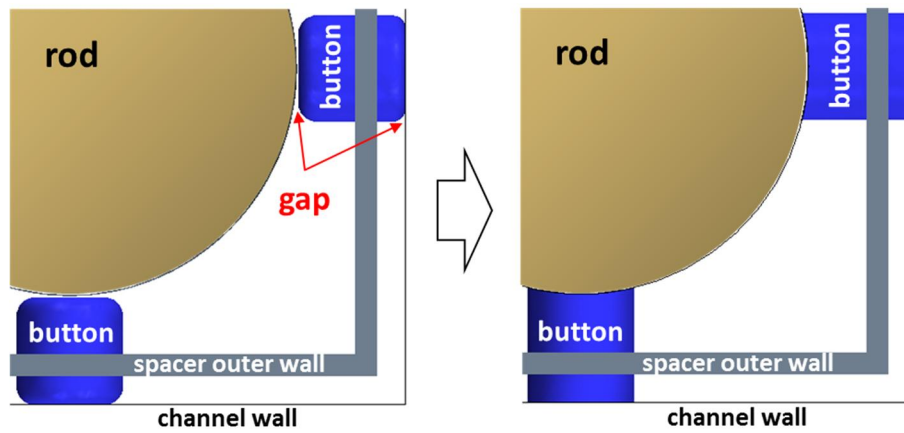


그림 2.4 CFD 해석 영역



(가)

(나)

그림 2.5 연료봉, 버튼, 지지격자의 실제 형상 (가)과 CFD 코드에서 모사한 형상(나)

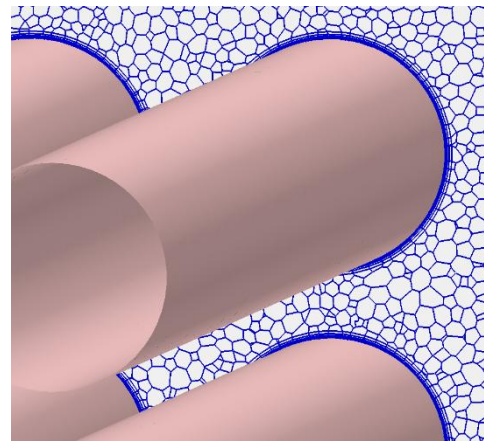
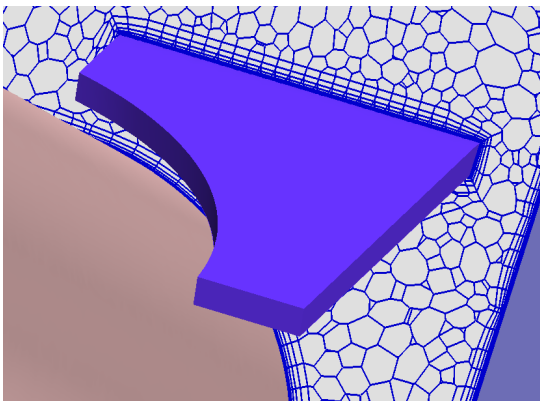
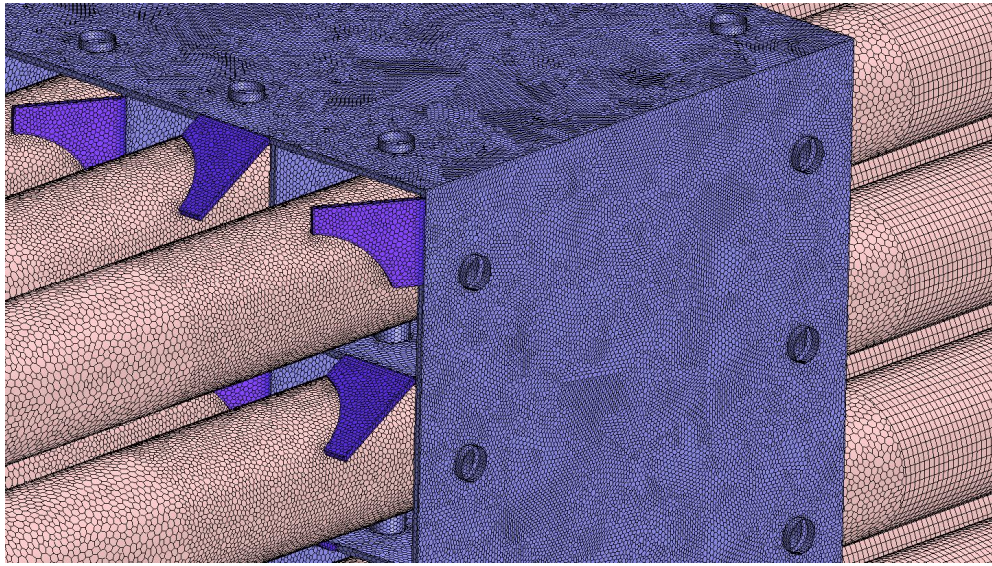


그림 2.6 생성된 격자와 혼합날개, 연료봉 부근 프리즘 층

2. 난류 모델에 따른 민감도 분석

실험 결과와 CFD 계산결과를 비교하여 생성한 격자를 검증하고 난류 모델에 따른 민감도를 분석하였다. 난류모델은 *realizable k-ε* 모델과 레이놀즈 응력 난류 모델을 사용하였다. 실험 결과는 4가지의 축방향 높이 ($0.5D_h$, $1.0D_h$, $4.0D_h$, $10.0D_h$), 3가지의 y방향 좌표 ($0.5P$, $1.5P$, $2.455P$), 2가지의 데이터 (x방향 속도와 y방향 속도)로 총 24개의 실험 데이터로 구성되어 있다. 두 난류 모델에 대해 계산결과와 실험 결과의 비교 검증 결과는 그림 2.7, 2.8, 2.9에 나와있다. $y=0.5P$, $y=1.5P$ 에서는 지지격자와 멀리 떨어질수록, $y=2.455P$ 에서는 지지격자와 가까울수록 두 모델 모두 실험 결과와의 유사도가 떨어졌다. $y=2.455P$ 의 경우 실험에서는 횡방향 유동이 벽면과 평행한 방향으로 일정하게 측정되었으나 CFD 계산에서는 이러한 경향성이 보이지 않았다. 전체적으로 난류 모델에 따른 결과의 차이는 크지 않으나, 지지격자에서 상대적으로 멀리 떨어져 있는 $4.0D_h$ 와 $10.0D_h$ 의 경우 레이놀즈 응력 모델이 실험 결과를 더 잘 예측했다는 것을 알 수 있다. 두 난류 모델에 대하여 정량적인 결과 분석은 표 2.1에 나타나 있다.

실험결과와의 차이를 제곱 평균 제곱근과 절댓값 평균 측면에서 비교한 결과 레이놀즈 응력 모델이 *realizable k-ε* 모델보다 실험 결과와 더 유사한 계산 결과를 도출해내는 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 레이놀즈 응력 모델을 채택하여 해석을 진행하였다.

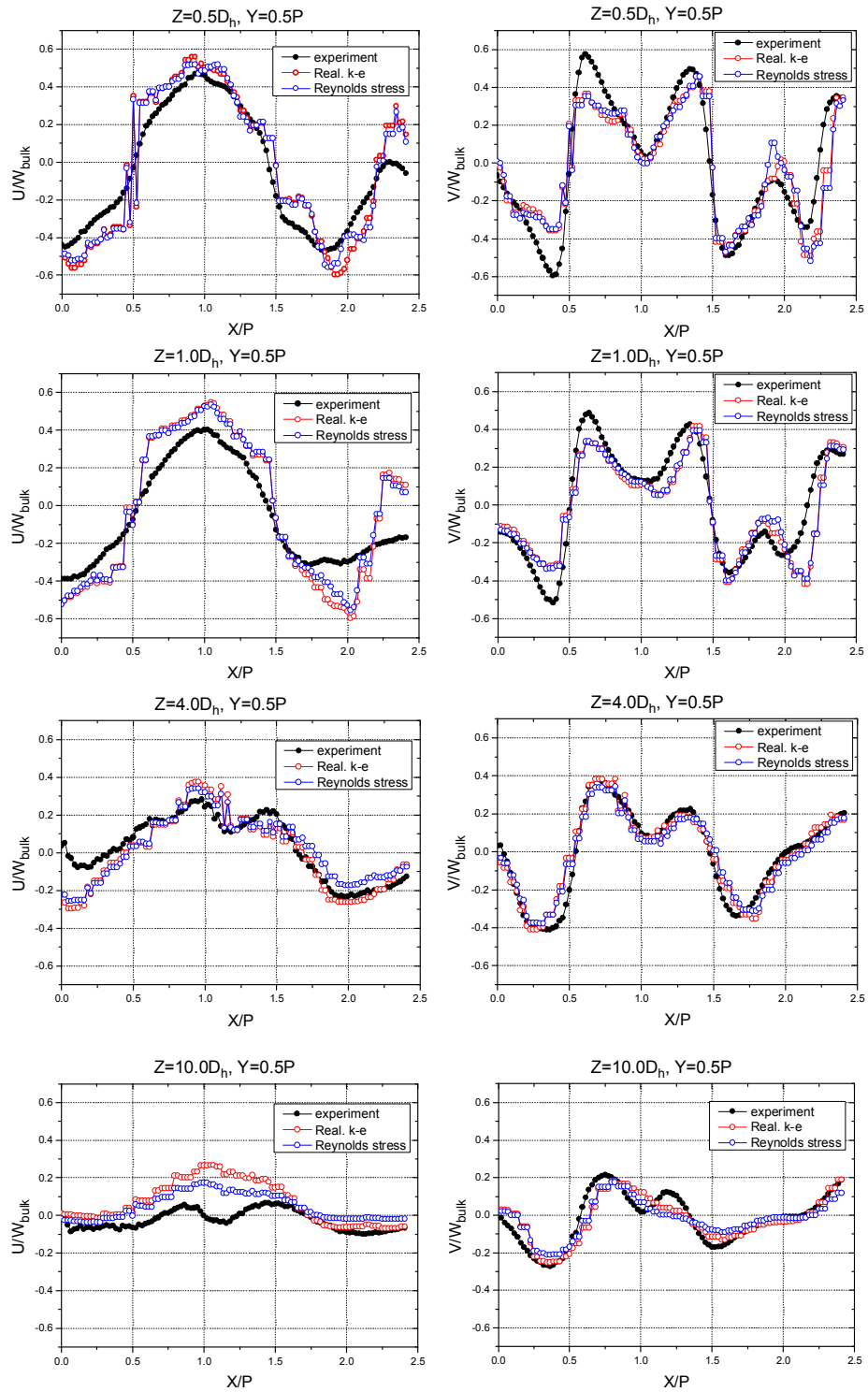


그림 2.7 $y=0.5P$ 에서 실험 결과와 해석결과 비교

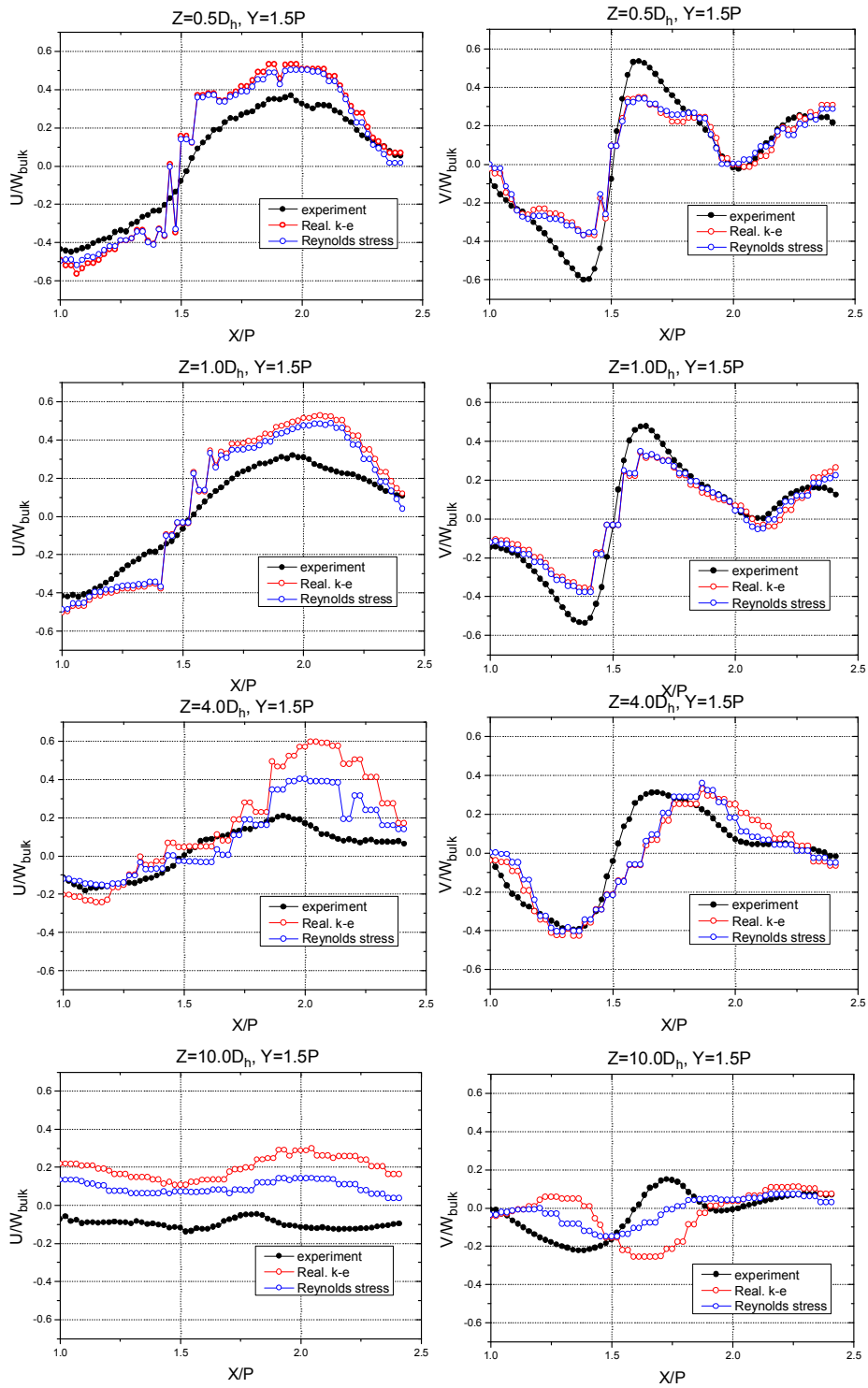


그림 2.8 $y=1.5P$ 에서 실험 결과와 해석결과 비교

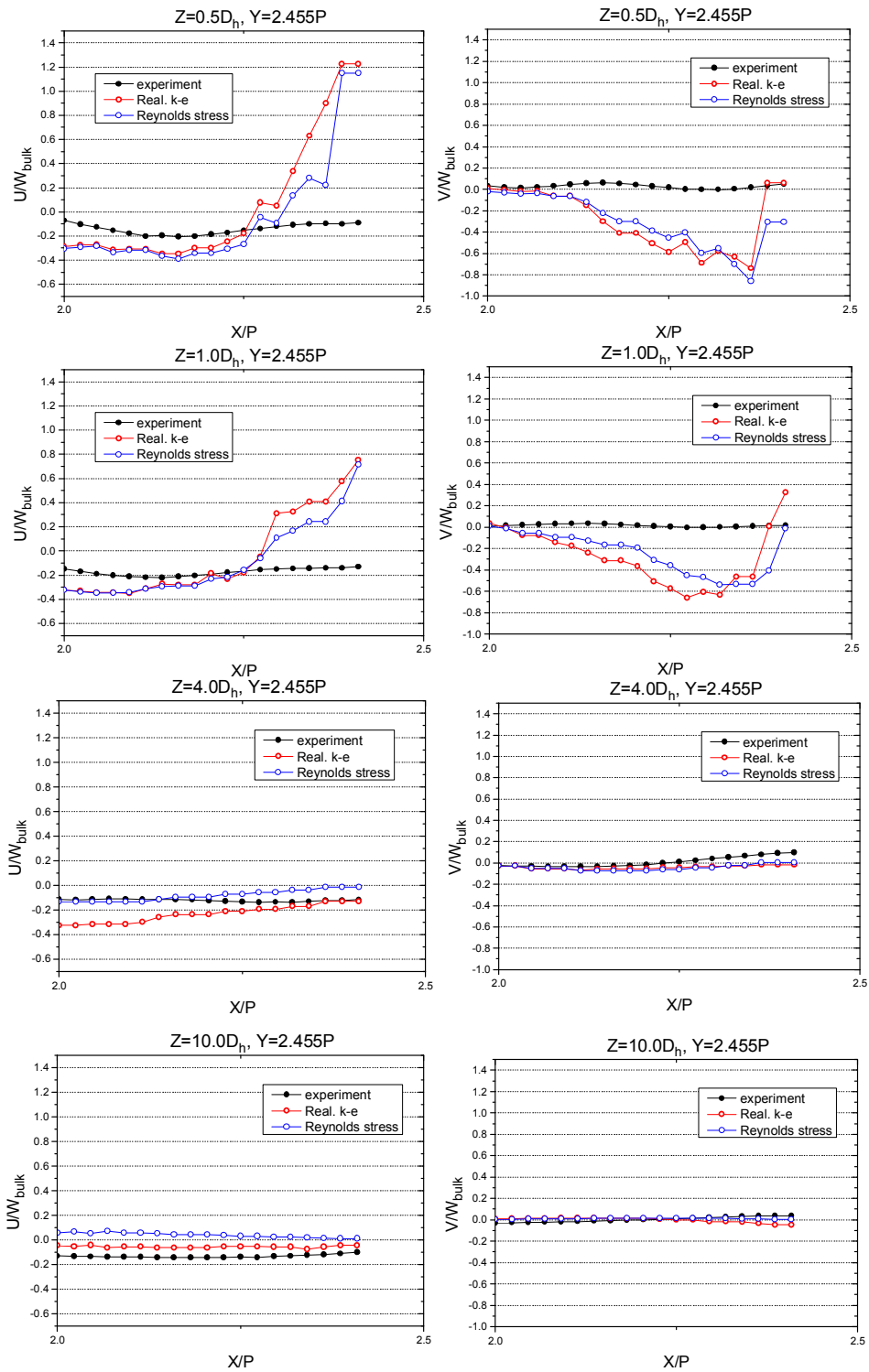


그림 2.9 $y=2.455P$ 에서 실험 결과와 해석결과 비교

표 2.1 난류 모델에 따른 실험 결과와의 유사도 분석

오차 계산법	Realizable k- ϵ 모델	레이놀즈 응력 모델
제곱 평균 제곱근 (Root mean square)	0.1692	0.1410
절댓값 평균 (Absolute value average)	0.3416	0.3170

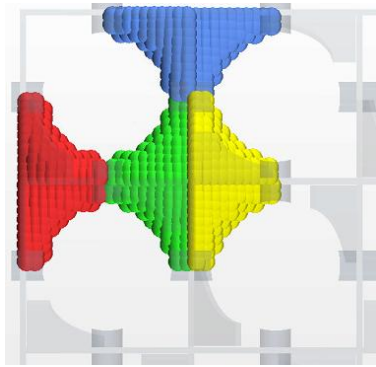
3. CFD 해석을 이용한 유선 분석

횡방향 대류 인자를 계산하기에 앞서 각 부수로에서의 횡방향 유동을 비교하기 위하여 유선을 분석하였다. 유선 분석을 통해 다음의 두가지를 확인하고자 하였다. 첫째는, 혼합날개의 형상으로 유추했던 횡방향 유동의 방향과 실제와의 일치 여부이며, 둘째는, 부수로의 종류에 따른 횡방향 유동 차이 여부이다.

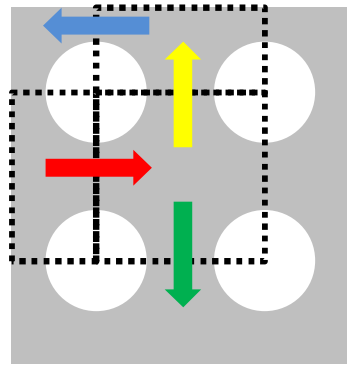
그림 2.10 (가)는 각 유선들의 출발 지점을 나타낸다. 혼합날개의 형상에서 유추한 바에 의하면 각 유선들은 그림 2.10 (나)와 같은 방향으로 횡방향 유동이 유도된다. 그림 2.11은 혼합날개 최상단에서부터 각각 50 mm, 70 mm, 90 mm 떨어진 위치에서의 유선의 분포를 나타낸다. 이에 따라 초기에 유추한 방향대로 실제 횡방향 유동이 전개됨을 알 수 있다. 그림 2.12는 각 유선들이 인접한 부수로로 이동한 비율을 높이에 따라 나타낸 그래프이다. 기존 실험 조건인 1.5 m/s 이외에 0.75 m/s부터 3 m/s 까지 초기 속도를 변화시켜가며 비율을 분석하였다. 그 결과 횡방향 유동은 초기 속도와 무관하다는 결론을 얻을 수 있었고, 각 간극을 지나 는 유선들의 횡방향 유동도 간극의 종류에 따라 다르다는 것을 알 수 있었다. 중앙 부수로에서 출발하는 녹색, 황색 유선의 경우 70 mm 위치에서부터 비율이 수렴하는 것을 알 수 있는데, 그림 2.11을 보면 남은 비율의 유선들은 부수로 내부에서 회전하는 것을 볼 수 있다. 이와 달리 모서리쪽 부수로에서 출발하는 청색, 적색 유선의 경우 유선이 부수로 내부에서 회전하는 유동을 보이지 않고 연료봉 표면을 따라 지속적으로 이동하는 것을 알 수 있다.

따라서 봉다발 구조에서 혼합날개에 의한 횡방향 유동은 크게 두 가지로 분류가 가능하다. 이는 연료봉 표면을 따라 회전하는 유동과 부수로 내부에서 회전하는 유동이다. 기존에 CTF 코드에서 사용하고 있는 지지격자-유도 횡류 모델에서는 간극 별로 횡방향 대류 인자가 정의되기 때문에 부수로 내부에서 회전하는 유동은 고려되지 않는다. 그러나 비엇갈림 격자를 사용하는 CUPID 코드에서는 부수로 전체에 대해 평균 횡방향 속도를 구하기 때문에 부수로 내부 유동도 고려되며, 이와 관련한 특징과 논의점은 다음과 같다. 우선 내부 유동에 의한 횡방향 속도는 간극에서의 횡방향 속도에 비해 작지만, 지지격자-유도 횡류 모델이 혼합날개에 의한 운동량 전달과 벽면 열전달 성능 향상을 대변하는 모델이라는 측면에서 부수로 내부 유동이 고려되는 것이 합리적이다.

또한 동일한 높이에서 중앙 부수로에서 출발하는 유선이 모서리 쪽 부수로에서 출발하는 유선보다 횡방향 유동이 더 활발한 것을 볼 수가 있기 때문에, 모든 부수로에 대해 동일한 횡방향 대류 인자를 정의하면 가장자리나 모서리 쪽의 횡방향 유동을 과대평가하는 결과를 야기한다는 점을 유추할 수 있다. 이를 보완하기 위해 2절에서는 각 부수로 종류별 횡방향 대류 인자를 계산하였다.



(가)



(나)

그림 2.10 각 유선의 시작 위치 (가)와 유도되는 횡류의 방향 (나)

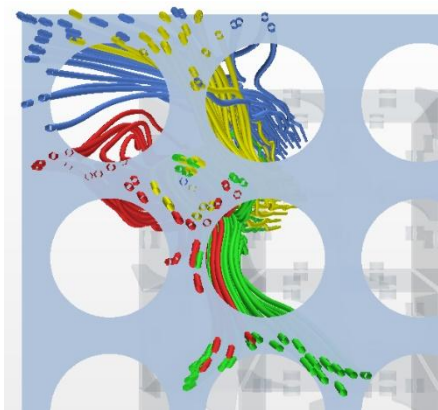
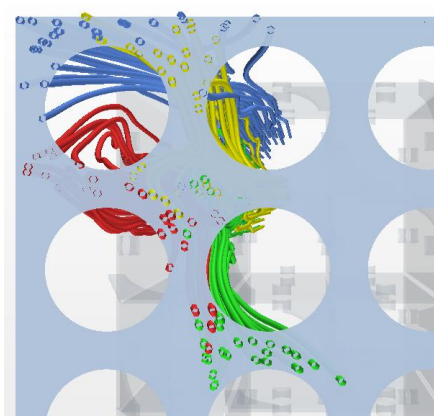
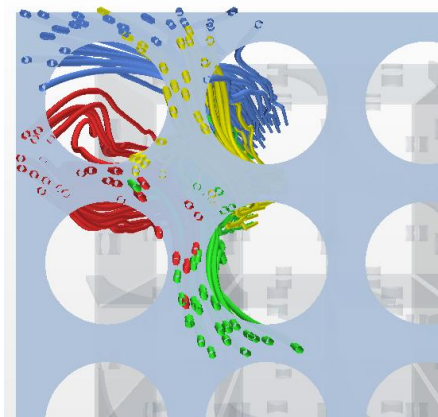


그림 2.11 혼합날개 최상단으로부터 50 mm (좌상단), 70 mm (우상단),
90 mm (좌하단) 떨어진 거리에서의 유선 분포

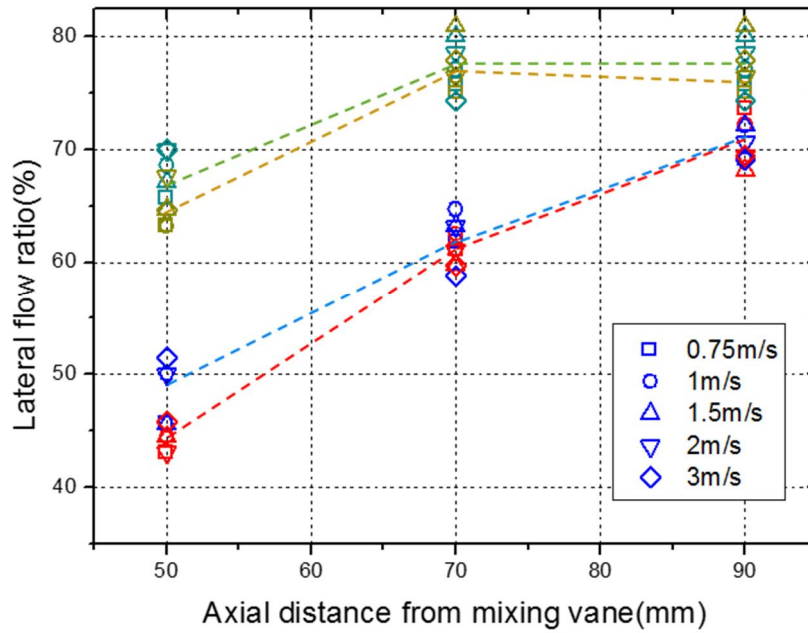


그림 2.12 초기 속도에 따른 높이 별 유선들의 인접한 부수로로 이동한 비율 비교

제 2 절 횡방향 대류 인자 계산

앞서 언급했듯이 CUPID 코드는 비엇갈림 격자를 사용하기 때문에 횡방향 대류 인자도 부수로 단위로 정의가 되어야 한다. 기존에 간극 단위로 횡방향 대류 인자를 정의할 때에는 각 간극에서 유도되는 횡방향 유동이 한 가지 방향으로 고정되어 있었으나, 부수로 단위로 정의할 경우에는 x, y방향으로 유도되는 횡방향 유동이 각각 존재한다. 두 방향을 모두 고려하기 위하여 부수로 단위의 횡방향 대류 인자는 x방향, y방향 횡방향 대류 인자의 평균으로 계산한다. 이와 같은 방법으로 횡방향 대류 인자를 정의하는 것은 부수로의 수평, 수직방향 4개의 간극에서의 횡방향 대류 인자의 평균값을 적용하기 위함이다. 부수로 단위 횡방향 대류 인자는 식 5와 같다.

$$f_{subchannel} = \frac{f_{sub,x} + f_{sub,y}}{2} = \frac{1}{2} \left(\frac{|U_x| + |U_y|}{U_{inlet}^{CFD}} \right) \quad (5)$$

여기서, $f_{subchannel}$: 부수로 단위 횡방향 대류 인자,

$f_{sub,x}$: 부수로의 x방향 횡방향 대류 인자,

$f_{sub,y}$: 부수로의 y방향 횡방향 대류 인자,

$|U_x|$: 해당 부수로의 x방향 속도 절댓값 평균,

$|U_y|$: 해당 부수로의 y방향 속도 절댓값 평균

x, y방향 속도의 경우 마주보는 간극에서 방향이 서로 반대이기 때

문에, 속도의 절댓값들의 평균을 계산하였다.

1. MATiS-H 형상에서의 횡방향 대류 인자 계산

그림 1.5의 부수로 1, 2, 8번에 대하여 횡방향 대류 인자 계산을 수행하였다. 지지격자 최상단으로부터 0~70 mm 거리에 대해 5 mm 간격으로 국부적인 횡방향 대류 인자를 계산하였다. 3장에서 다룬 CUPID 코드의 부수로 단위 해석에서 지지격자-유도 횡류 모델이 적용되는 부수로의 축방향 높이가 70 mm이기 때문에 70 mm까지의 국부적인 횡방향 대류 인자를 계산 후, 평균하여 적용하였다. 계산 결과는 그림 2.13과 같다.

전반적으로 높이가 증가함에 따라 횡방향 대류 인자의 크기가 감소하는 경향을 보이나, 가장자리 쪽 부수로인 1번 부수로는 0~30 mm 구간에서 횡방향 대류 인자가 증가하는 경향을 보인다. 1번 부수로의 경우 혼합날개에 의해 직접적으로 횡방향 유동이 전개되는 것이 아니라 인접한 부수로의 횡류에 의해서 간접적으로 횡방향 유동이 전개되는 형식이기 때문에 지지격자와 가까운 위치에서 상대적으로 횡방향 유동이 적게 전개되는 것으로 분석된다. 0~70 mm 구간에서 횡방향 대류 인자의 평균은 1, 2, 8번 부수로에 대해 각각 0.12, 0.15, 0.27로 계산되었다. 앞서 유선 분석을 통해 유추한 바와 같이 가장자리와 모서리 쪽 부수로에서 횡방향 대류 인자가 상대적으로 더 작게 계산되는 것을 알 수 있다.

다음은 같은 1, 2, 8번 부수로에 대해 수평, 수직방향 벽면 조건을 기존의 일반적인 벽면 경계조건에서 대칭 평면으로 변경하여 같은 계산을 수행하였다. 이는 가장자리와 모서리 쪽 부수로에서 횡류가 상대적으로

적게 유도되는 것이 단순히 벽에 의한 효과인지, 그 외에 요인이 존재하는지 알아보기 위함이다. 또한 MATiS-H 실험 장치와 같이 집합체가 벽으로 둘러싸여 있는 형상 외에 벽이 없는 집합체에서도 본 연구를 통해 계산된 횡방향 대류 인자를 적용할 수 있는지 알아볼 수 있다.

결과는 그림 2.14와 같다. 오차범위 이내에서 벽면 경계조건에 따른 횡방향 대류 인자의 값은 일정한 것을 알 수 있다. 따라서 각 집합체가 벽으로 둘러싸여 있는 비등경수로 등과 같은 형상 외에도 APR1400과 같이 집합체와 집합체 사이에 벽이 없는 구조에서도 동일한 값의 횡방향 대류 인자를 적용할 수 있다고 할 수 있다.

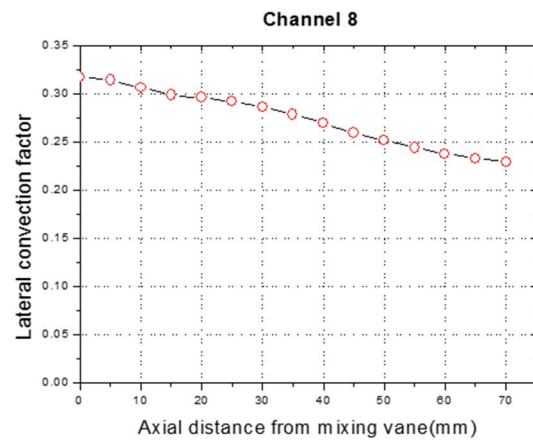
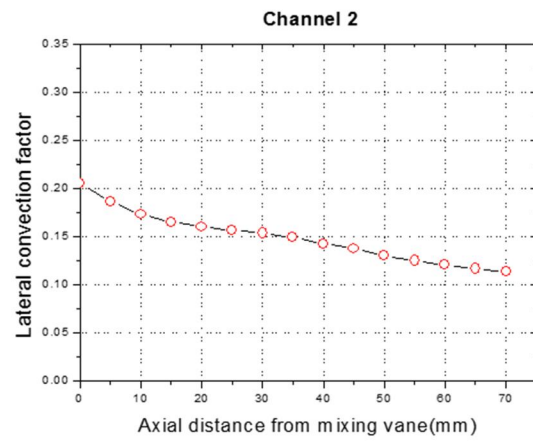
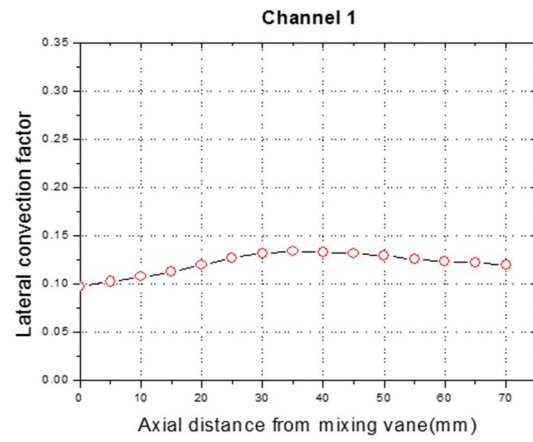


그림 2.13 1, 2, 8 번 부수로에서 높이에 따른 횡방향 대류 인자

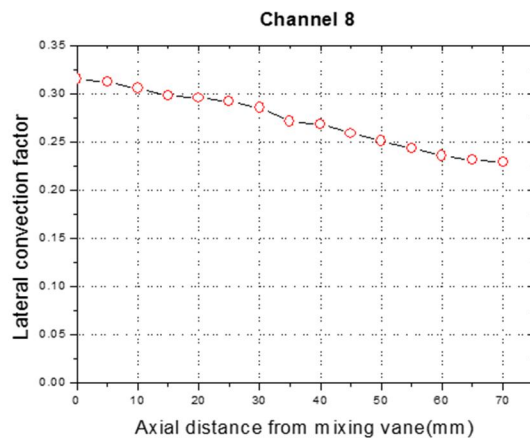
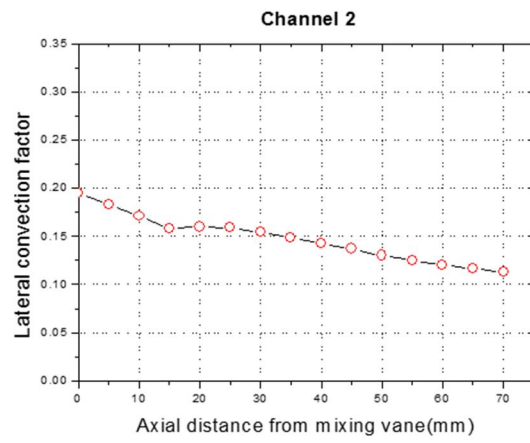
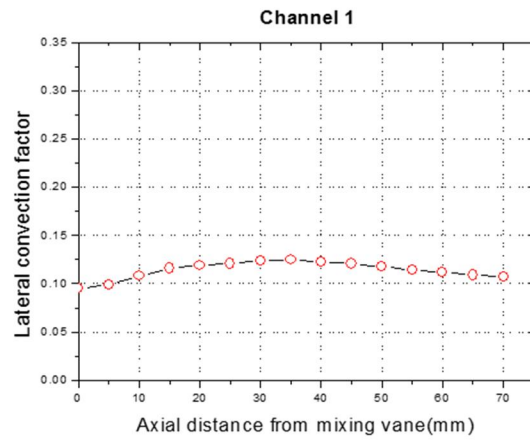


그림 2.14 대칭 평면 조건에서 1, 2, 8 번 부수로에서 높이에 따른 횡방향
대류 인자

2. 안내관 근처 형상에서의 횡방향 대류 인자 계산

APR1400과 같은 CE형 핵연료 집합체의 경우 가장자리, 모서리에 위치한 부수로 외에도 안내관과 인접한 부수로들도 따로 종류를 분류해야 한다. CFD 해석에서 CE형 핵연료 집합체의 안내관을 모사하기 위해 MATIS-H 실험 형상에서 가장자리에 연료봉 한 개를 제거하고, 그 자리에 반지름이 연료봉간 간격과 같은 크기의 1/4 안내관 구조를 삽입하였다. 삽입한 모습은 그림 2.15와 같다. 수평, 수직방향 벽면 경계조건은 대칭 평면으로 설정하였다.

25, 26번 부수로의 높이별 횡방향 대류 인자는 그림 2.16과 같다. 25번 부수로의 경우 20~45 mm 구간에서 횡방향 대류 인자가 증가하는 분포를 띄는데, 1번 부수로와 동일하게 인접한 부수로에서 넘어오는 횡류에 의해서 횡방향 유속이 증가하는 것으로 분석된다. 0~70 mm 구간의 평균 횡방향 대류 인자는 25번 부수로에서 0.27, 26번 부수로에서 0.24로 계산되었다. 총 5가지의 부수로에서 지지격자 최상단으로부터 0~70 mm 구간에서의 횡방향 대류 인자를 계산하였고, 이를 정리한 결과는 표 2.2와 같다.

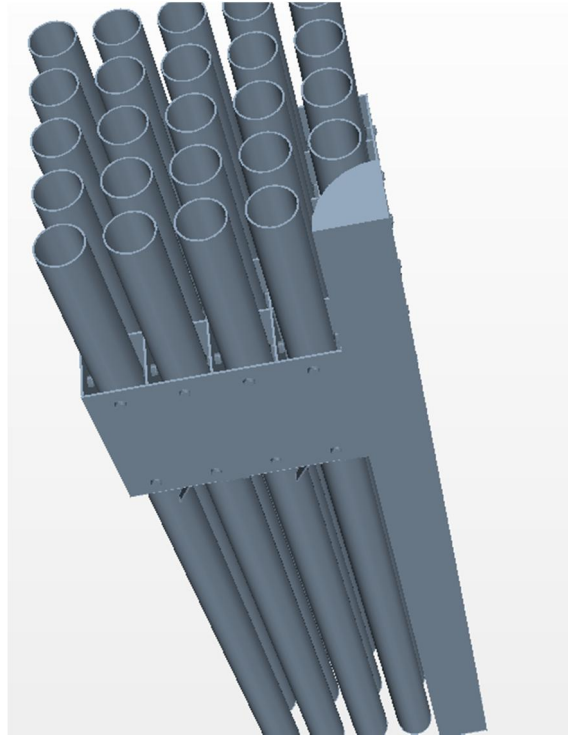


그림 2.15 CE 형 안내관 1/4 구조가 삽입된 집합체 형상

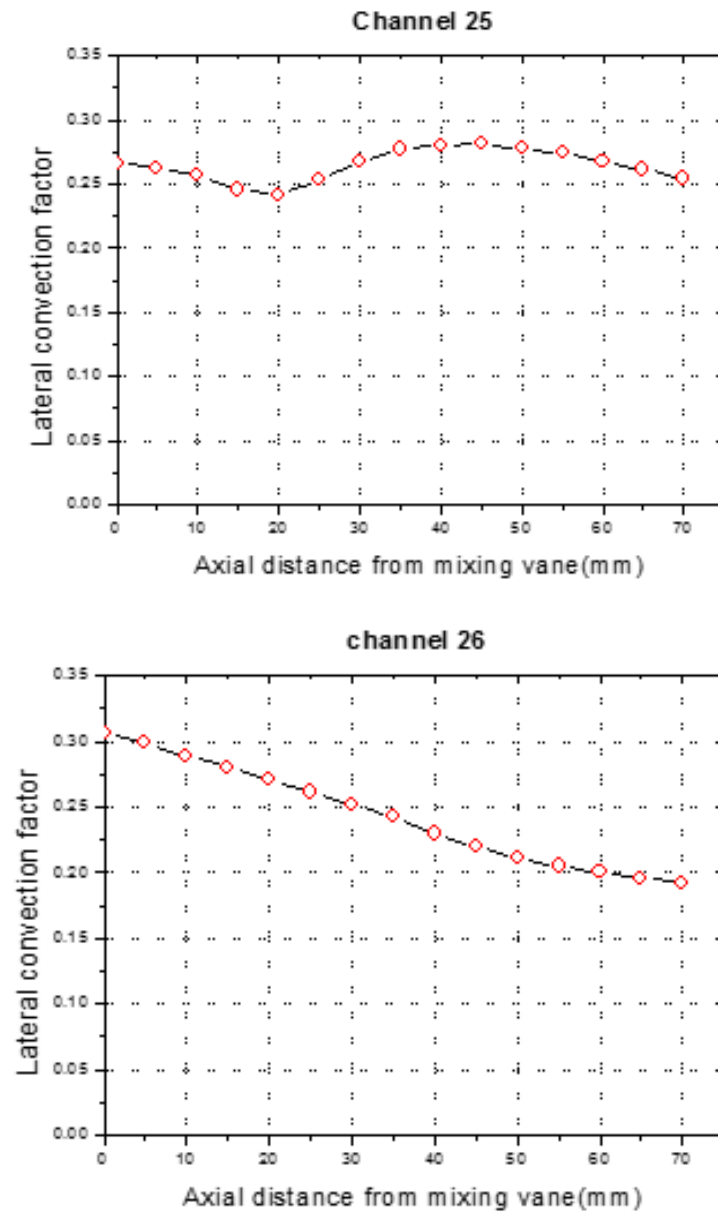


그림 2.16 25, 26 번 부수로에서 높이에 따른 횡방향 대류 인자

표 2.2 각 부수로 별 횡방향 대류 인자

부수로 번호	부수로 위치	횡방향 대류 인자
1	가장자리	0.12
2	모서리	0.15
8	중앙부	0.27
25	안내관과 인접한 모서리	0.27
26	안내관과 인접한 중앙부	0.24

3. 횡방향 대류 인자에 관한 고찰

앞서 CFD 해석을 통해 부수로 종류 별로 혼합날개에 의해 유도되는 횡방향 유동의 크기가 다르고, 같은 높이에서 횡방향 대류 인자의 크기가 다르다는 점을 알게 되었다. 벽면 경계조건에 따른 횡방향 대류 인자의 변화는 없는 것으로 분석되었고 횡방향 대류 인자의 크기를 바꾼 요인으로는 공극률과 부수로 내에 포함된 혼합날개의 개수가 있다.

표 2.3은 각 부수로 별 횡방향 대류 인자, 공극률, 부수로 내에 포함된 혼합날개의 개수를 비교한 결과이다. 먼저 공극률의 경우 다른 부수로들은 큰 차이를 보이지 않으나 25번 부수로는 상대적으로 작은 것을 알 수 있다. 25번 부수로와 동일하게 모서리 쪽에 위치한 2번 부수로와 비교하면 같은 혼합날개 구조에서 공극률의 비율만큼 횡방향 대류 인자가 차이를 보이는 것을 확인할 수 있다. 같은 형상의 혼합날개 구조에서 25번 부수로는 비교적 적은 양의 유체가 지나가기 때문에 혼합날개가 유체에 미치는 영향이 크고, 횡방향 유동도 상대적으로 크게 유도되는 것을 알 수 있다.

그림 2.17은 각 부수로 종류별로 부수로 내부에 포함된 혼합날개의 모습을 나타낸다. 8번, 26번 부수로와 같은 중앙 부수로는 동일하게 혼합날개가 2개씩 부착되어 있어 앞서 진행한 유선 분석에서도 볼 수 있었듯이 부수로 간극 사이 유동 이외에도 내부 유동을 발생시킨다. 반면 모서리 쪽 부수로인 2번과 25번 부수로에는 1개의 혼합날개가 포함되어 있고, 가장자리 쪽 부수로인 1번 부수로에는 혼합날개가 포함되어 있지 않다. 횡방향 유동은 혼합날개 구조에 의해 직접적으로 발생되어 집합

체 전체로 퍼져나가는 원리이기 때문에, 혼합날개가 부수로 내부에 포함되어 있다면 그만큼 횡방향 유동도 보다 빨리 생성되고 유속도 크다. 따라서 공극률이 눈에 띄게 낮은 25번 부수를 제외하면 횡방향 대류 인자는 부수로 내부에 혼합날개가 많을수록 더 크게 계산된다. 중앙 부수로에서는 혼합날개에 의한 횡방향 유동이 부수로 내부에서부터 생성되어 가장 큰 횡방향 대류 인자 값을 가지게 되고, 가장자리 쪽 부수로의 경우 인접한 부수로에서 생성된 횡방향 유동이 전달되어 간접적으로 횡류가 발생되기 때문에 가장 작은 횡방향 대류 인자를 가지게 된다.

표 2.3 각 부수로 별 횡방향 대류 인자 및 요인 비교

부수로 번호	횡방향 대류 인자	공극률	혼합날개 개수
1	0.12	0.66	0
2	0.15	0.61	1
8	0.27	0.55	2
25	0.27	0.33	1
26	0.24	0.60	2

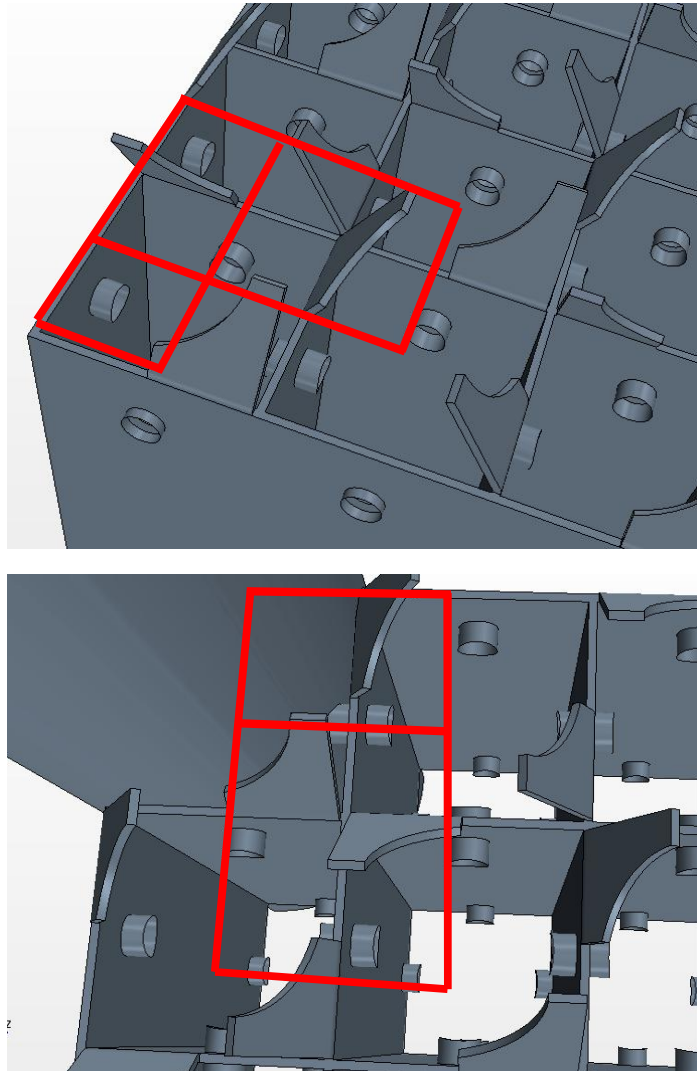


그림 2.17 각 부수로 내부에 포함된 혼합날개의 개수 비교

제 3 장 지지격자-유도 횡류 모델의 개선

2장에서는 CFD 해석을 통해 기존 지지격자-유도 횡류 모델과 달리 부수로의 종류에 따라 다른 크기의 횡방향 대류 인자를 적용해야 한다는 결론을 얻게 되었다. 앞서 계산된 횡방향 대류 인자를 CUPID 부수로 해석에 적용하고, 이를 검증하기 위해 PSBT 열 혼합 실험 해석을 진행하였고 APR1400 전노심 해석을 수행하여 노심열수력 해석 측면에서 개선된 지지격자-유도 횡류 모델의 작동 여부를 확인하였다.

제 1 절 PSBT 열 혼합 실험

PSBT 실험은 NUPEC (Nuclear Power Engineering Corporation)에서 진행한 5x5 가열 봉다발 실험이다 (Rubin, 2012). PSBT 실험 장치는 그림 3.1과 같다. 연료봉의 외경은 9.5 mm이고, 연료봉 간 간격은 126 mm, 가열부의 길이는 3658 mm이다. 229 mm 길이의 지지격자가 총 17개 설치되어 있으며, 이중 7개의 지지격자에는 분리형 혼합날개가 설치되어 있다.

실험 벤치마크는 크게 두 가지의 실험 결과를 제공하는데, 기포율 분포 벤치마크와 DNB (Departure from Nucleate Boiling) 벤치마크이다. PSBT 열 혼합 실험은 DNB 벤치마크에 포함되어있는 정상상태 유체 온도 벤치마크에 포함되어 있는 실험이다. 단상유동 조건에서 비대칭적인 출력 분포를 가지는 집합체에서 출구 온도 분포를 알아보는 실험으로, 실험 번호는 PSBT 01-5343번이다. 그림 3.2는 열 혼합 실험에서의 출력

분포를 나타낸다. 그 밖의 초기 조건은 표 3.1에 나타내었다. 본 연구에서는 단상유동 조건에서 CUPID 코드에 적용된 지지격자-유도 횡류 모델이 혼합날개에 의한 유동을 실제 현상에 가깝게 예측하는지 검증하기 위하여 PSBT 열 혼합 실험을 모사하였다.

표 3.1 PSBT 열 혼합 실험 초기조건

압력	150.3 bar
입구 온도	438.5 K
입구 속도	1.53 m/s
전체 출력	1.25 MW

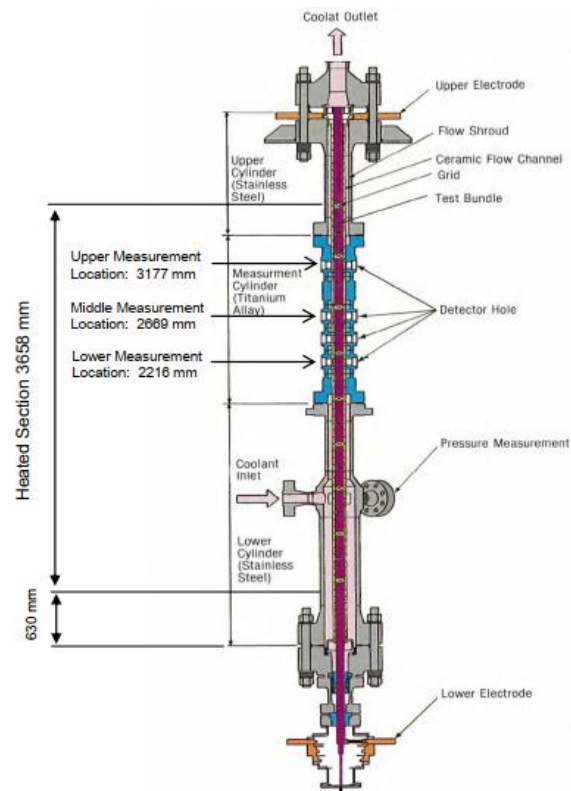


그림 3.1 PSBT 실험장치 (Rubin, 2012)

1.639	1.639	0.410	0.410	0.410
1.639	1.639	1.639	0.410	0.410
1.639	1.639	0.410	0.410	0.410
1.639	1.639	1.639	0.410	0.410
1.639	1.639	0.410	0.410	0.410

그림 3.2 PSBT 열 혼합 실험 출력 분포

1. PSBT 열 혼합 실험 검증 결과

실험 결과의 출구 온도 분포는 그림 3.3과 같다. 그림 3.4 (가)는 CUPID 부수로 단위 해석에서, 기존의 모델과 동일하게 횡방향 대류 인자를 0.27로 균일하게 적용한 경우의 출구 온도 분포이고, 그림 3.4 (나)는 2장에서 계산한 부수로 별 횡방향 대류 인자를 적용한 계산 결과이다. 실험 결과는 최고 온도가 좌측 상단에, 최저 온도가 우측 하단에 위치하는 분포를 보였는데 수정된 횡방향 대류 인자를 적용한 계산에서 이러한 경향을 잘 예측한 것을 볼 수 있다.

초기 출력 분포는 좌측의 출력이 높고 우측의 출력이 낮기 때문에 실험 결과와 같은 온도 분포가 나타나기 위해서는 그림 3.5와 같이 전체적으로 시계 방향의 횡방향 유동이 전개되어야 한다. 그림 3.6은 균일한 횡방향 대류 인자와 수정된 횡방향 대류 인자의 값을 적용한 CUPID 계산에 대해 유선을 비교한 모습이다. 균일한 횡방향 대류 인자를 적용했을 때는 유선이 시계 반대 방향으로 형성되어 있는 반면, 2장에서 계산한 횡방향 대류 인자를 적용한 경우 유선이 시계 방향으로 형성되는 것을 확인할 수 있다.

그림 3.7은 그림 1.3과 같은 PSBT 실험장치에 부착된 분리형 혼합 날개에 의해 각 간극에서 유도되는 횡방향 유동에서 가장자리 쪽 간극에서의 횡방향 유동을 강조한 모습이다. 2장에서 진행한 CFD 해석에 의하면 기존대로 횡방향 대류 인자를 0.27로 균일하게 적용하였을 때 가장자리 쪽 횡방향 유동이 실제보다 과도하게 적용되기 때문에, 그림 3.6 (가)와 같이 횡방향 유동이 전체적으로 가장자리 쪽 유동의 방향과 일

치하게 계산되었다. 반면 수정된 횡방향 대류 인자를 적용한 경우 이는 가장자리 쪽 횡방향 유동의 억제를 야기한다. 이에 따라 전체적인 횡방향 유동이 가장자리와 인접한 부수로 간극에서의 횡방향 유동 방향과 동일하게 시계 방향으로 형성됨을 확인하였으며, 본 경우가 실험 결과를 잘 예측한다고 할 수 있다.

그림 3.8은 각각 CTF 코드와 시안 대학교 (Xi'an Jiaotong University)에서 개발중인 부수로 단위 해석 코드 ATHAS (S. Dong, 2018)를 이용한 PSBT 열 혼합 실험 계산 결과이다. CTF 코드의 경우 지지격자-유도 횡류 모델을 적용하였고 횡방향 대류 인자는 0.27로 균일하게 설정되었다. ATHAS 코드 계산은 유동 저항 모델 (Distributed Resistance Model; DRM)이 사용되었다 (S. Dong, 2018).

CTF 코드 계산의 경우 기존의 실험 결과나 CUPID 코드 계산과 달리 일정한 방향의 횡방향 유동이 관측되지 않고 균일하게 혼합되는 결과를 보였고, ATHAS 코드 계산의 경우 균일한 횡방향 대류 인자를 적용한 CUPID 계산과 유사한 분포를 나타냈다. 각 계산과 실험 결과 간의 편차의 제곱 평균 제곱근과, 실험에서 온도가 가장 높게 나타난 부수로에서의 온도 차이를 표 3.2에 나타내었다. 수정된 횡방향 대류 인자를 적용한 CUPID 계산이 다른 혼합날개 모델을 적용한 계산과 비교하여 실험 결과에서 최고 온도에 해당하는 부수로의 위치를 잘 예측하였고, 안전해석 측면에서 횡방향 대류 인자의 수정이 효과가 있을 것으로 기대된다.

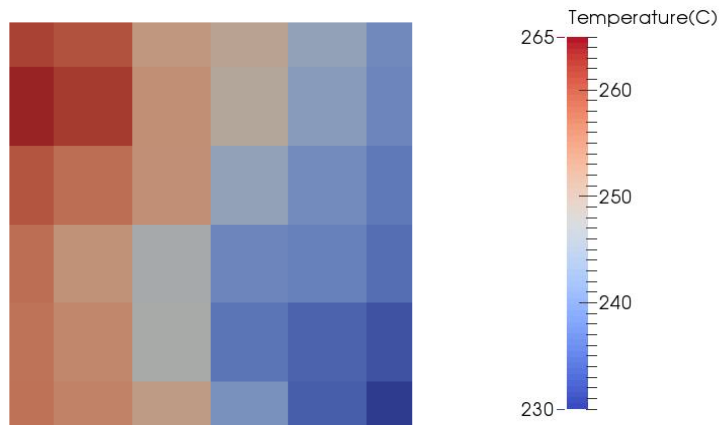


그림 3.3 PSBT 열 혼합 실험 결과의 출구 온도 분포

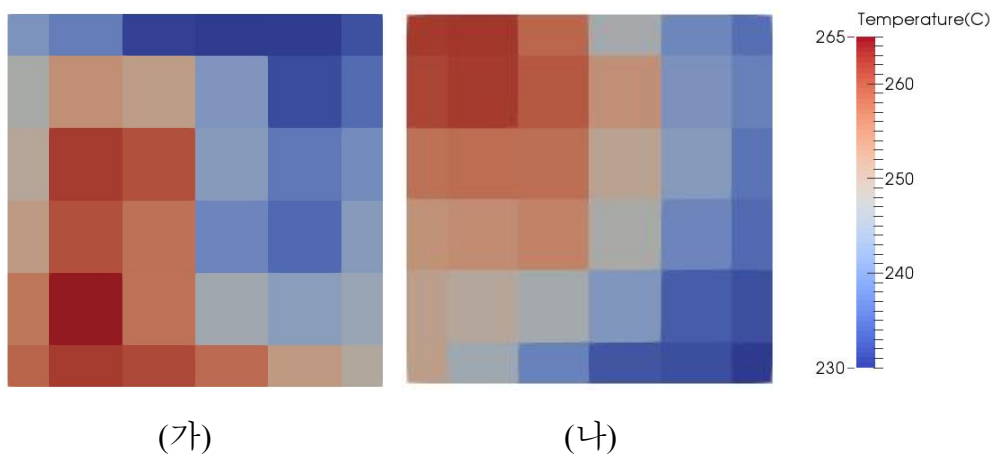


그림 3.4 CUPID 코드의 열 혼합 실험 해석 결과

(가) 균일 횡방향 대류 인자 적용 (나) 수정 횡방향 대류 인자 적용

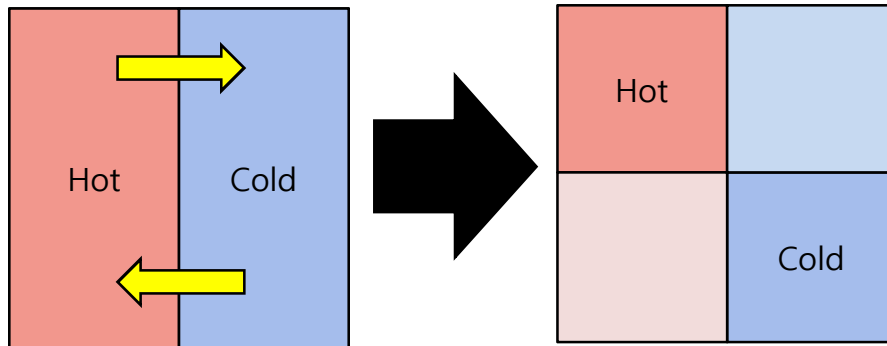


그림 3.5 PSBT 열 혼합 실험의 횡방향 유동 방향 예측 개념도

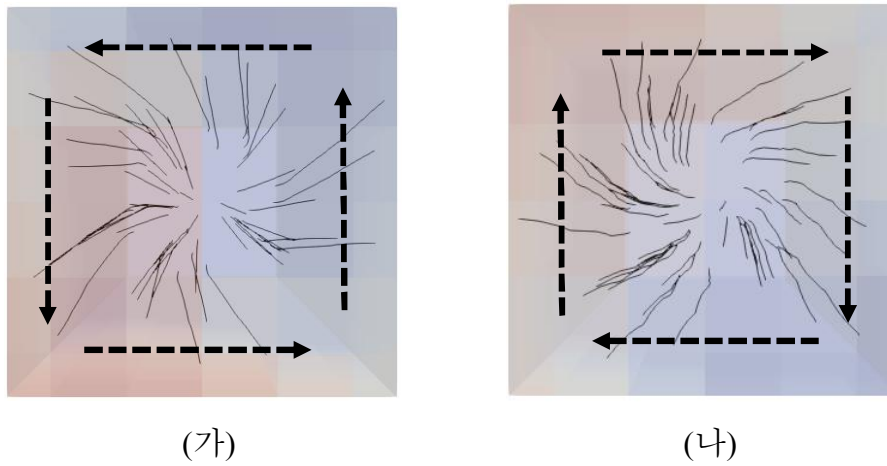


그림 3.6 균일한 횡방향 대류 인자 (가)를 적용했을 때와 수정된 횡방향 대류 인자 (나)를 적용했을 때의 CUPID 계산 결과의 유선 분포

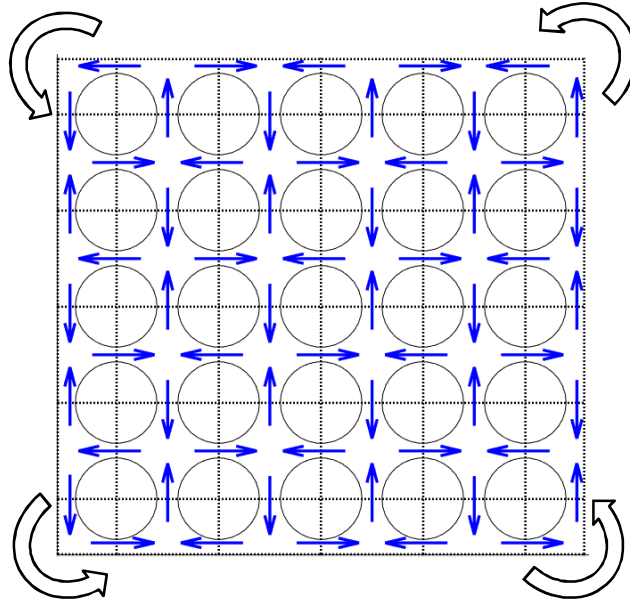


그림 3.7 PSBT 실험장치의 가장자리 부근 횡방향 유동

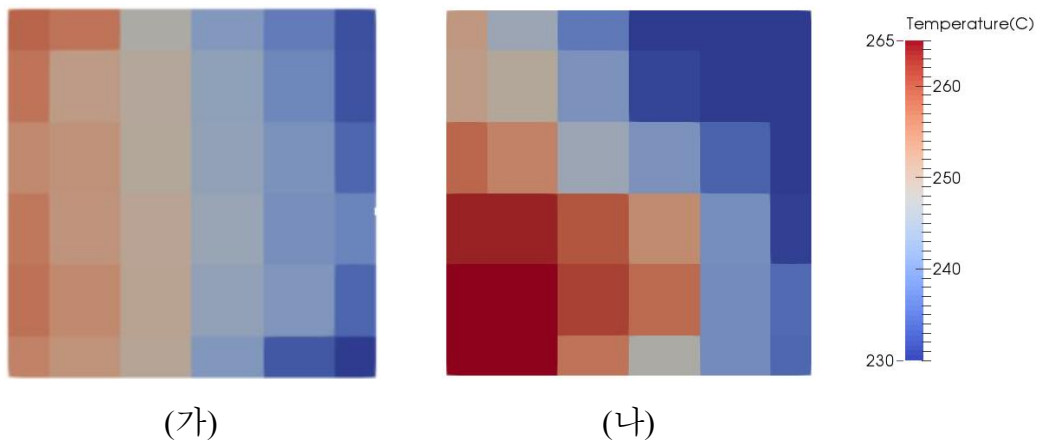


그림 3.8 PSBT 열 혼합 실험의 CTF 코드 (가)와 ATHAS 코드 (나) (S. Dong, 2018) 계산 결과

표 3.2 PSBT 열 혼합 실험 검증 결과 비교

부수로 코드	혼합날개 모델	RMS 편차	최대 온도 부수로 편차
CUPID	지지격자-유도 횡류 모델 (수정된 횡방향 대류 인자)	3.1 K	0.35 K
CTF	지지격자-유도 횡류 모델 (균일한 횡방향 대류 인자)	4.2 K	1.15 K
ATHAS	유동 저항 모델	4.3 K	5.7 K

제 2 절 APR1400 전노심 해석

3장 1절에서 수정된 횡방향 대류 인자를 적용한 CUPID 코드의 지지격자-유도 횡류 모델이 PSBT 열 혼합 실험 결과를 타당하게 모사하는 것을 확인하였다. 2절에서는 수정된 횡방향 대류 인자를 이용하여 APR1400 전노심 해석을 수행하고, DNBR (Departure of Nucleate Boiling Ratio) 측면에서 결과를 분석하였다.

1. APR1400 단일 집합체 계산

전노심 해석 수행에 앞서 단일 집합체 해석을 수행하여 혼합날개 모델에 의한 유동 경향성을 분석하였다. APR1400 출력 분포는 중성자 수송 해석 코드인 nTRACER의 계산 결과 (Jung Y. S., 2013)를 사용하였다. 단일 집합체 계산에는 그림 3.9와 같은 8번 집합체의 출력 분포를 사용하였다. 8번 집합체의 출력 분포는 수직방향 기준으로 상부는 출력이 없고, 하부는 대체로 균일한 값을 가지고 있다. 따라서 지지격자-유도 횡류 모델을 APR1400 계산에 적용하였을 때 혼합날개에 의한 온도 분포 변화를 알아보기 위해 8번 집합체와 같이 출력 분포가 극단적으로 분리되어 있는 조건을 채택하였다.

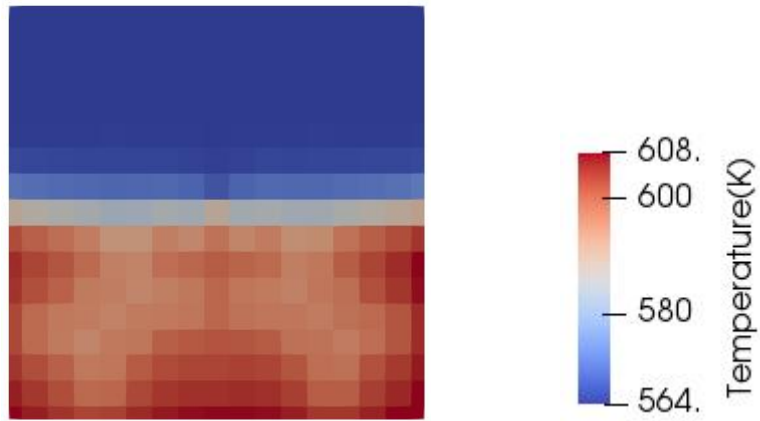
CUPID 해석 결과는 그림 3.10과 같다. (가)는 혼합날개 모델을 적용하지 않은 경우, (나)는 횡방향 대류 인자를 0.27로 균일하게 적용한 경우, (다)는 수정된 횡방향 대류 인자를 적용한 경우의 출구 온도 분포를 나타낸 그림이다.

혼합날개 모델을 적용한 두 계산은 그림 3.10 (가)와 비교하여 고온 및 저온 유체 간 혼합이 모사되는 것을 확인할 수 있다. (나)와 (다)의 계산 결과에서 각 부수로의 온도 편차의 제곱 평균 제곱근은 1.66 K으로 계산되었다. 그림에 표시된 중앙의 수직선을 기준으로 두 계산 결과를 비교하면, 상대적으로 (다)의 경우는 중앙 안내관 부근에서 좌우 비대칭적인 온도 분포를 나타내는 반면 (나)의 경우 좌우 비대칭적인 분포를 나타내는 것을 볼 수 있다. 그림 3.10에 표시된 수직선을 따라 (나)와 (다) 계산에서 온도 분포를 비교한 그래프는 그림 3.11과 같다. 상대적으로 (다)의 경우 안내관 부근에서 온도가 더 균일한 결과를 나타낸다.

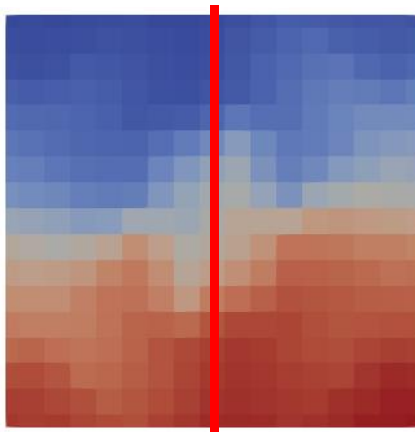
그림 3.12는 APR1400 형상의 중앙 안내관 부근에서 혼합날개에 의한 횡방향 유동의 방향을 나타낸다. 안내관 부근의 혼합날개 형상은 비대칭적인 구조를 가지고 있어, 그림 3.10 (나)와 같이 대각선 방향으로 치우친 횡방향 유동이 유도되는 것을 알 수 있다. 그림 3.10 (다)의 계산은 안내관 근처 부수로의 횡방향 대류 인자를 감소시켰기 때문에 안내관 부근의 비대칭적인 횡방향 유동의 특성이 상대적으로 덜 나타났다고 분석된다.

0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.24	0.25	0.00	0.00	0.25	0.24	0.23	0.23	0.22	0.22	0.22
0.23	0.23	0.23	0.23	0.24	0.24	0.24	0.25	0.25	0.24	0.24	0.23	0.23	0.23	0.22	0.22
0.23	0.23	0.24	0.25	0.25	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.25	0.24	0.23	0.23	0.23
0.23	0.23	0.25	0.00	0.00	0.25	0.24	0.23	0.23	0.24	0.25	0.00	0.00	0.24	0.23	0.23
0.23	0.24	0.25	0.00	0.00	0.25	0.23	0.23	0.23	0.23	0.25	0.00	0.00	0.24	0.23	0.23
0.23	0.23	0.24	0.25	0.25	0.24	0.23	0.23	0.23	0.23	0.24	0.25	0.24	0.23	0.23	0.23
0.23	0.23	0.23	0.24	0.24	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23
0.24	0.23	0.23	0.24	0.24	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23	0.23

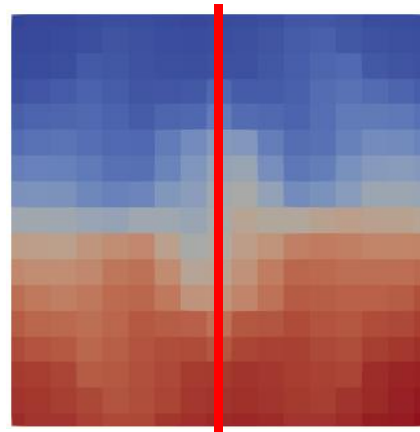
그림 3.9 nTRACER 계산의 APR1400 8 번 집합체의 출력 분포



(가)



(나)



(다)

그림 3.10 APR1400 8 번 집합체 출구 온도 분포의 CUPID 해석 결과

(가) 혼합날개 모델 미적용 (나) 균일 횡방향 대류 인자 적용

(다)수정 횡방향 대류 인자 적용

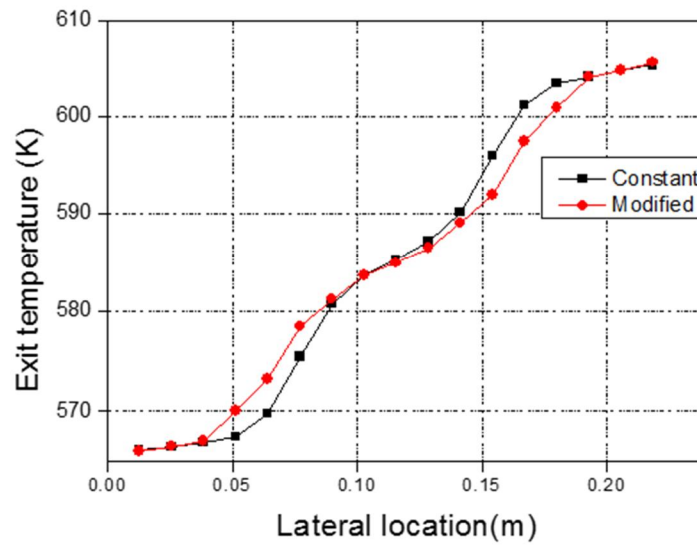


그림 3.11 중앙 수직선 상에서 횡방향 대류 인자에 따른 온도 분포 비교

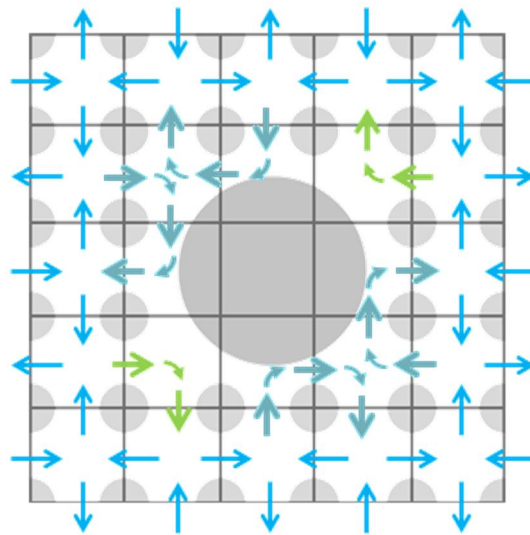


그림 3.12 APR1400 중앙 안내관 부근의 혼합날개에 의한 횡방향 유동

2. APR1400 전노심 계산 결과 비교

APR1400 단일 집합체 계산에서 횡방향 대류 인자를 부수로 종류별로 다르게 적용하였을 때 해석결과의 차이를 보인다는 것을 알 수 있었다.

이를 바탕으로 APR1400 전노심 해석을 수행하고, 횡방향 대류 인자에 따른 DNBR을 비교하였다. DNBR 계산에 사용한 임계 열 유속 (critical heat flux) 상관식은 CE-1 상관식 (C-E report, 1976)을 사용하였으며 식 6과 같다.

$$q''_{crit} = \frac{1}{2} b_1 \left(\frac{d}{d_m} \right)^{b_2} [(b_3 + b_4 P) G^{b_5 + b_6 P} - G H_{fg} X] C^{-(b_7 P + b_8 G)} \quad (6)$$

여기서, q''_{crit} : 임계 열 유속, 10^6Btu/hr ft^2 ,

$b_1 \sim b_8$: 상수,

d : 부수로의 등가 지름 (equivalent diameter), in,

d_m : 전체 형상에 대한 등가 지름, in,

P : 압력, psia,

X : 증기 체적율,

G : 질량 유속, 10^6lb/hr ft^2

무차원 상수 $b_1 \sim b_8$ 은 표 3.3과 같다.

표 3.3 CE-1 상관식 상수

b_1	2.8922×10^{-3}	b_5	-0.67757
b_2	-0.50749	b_6	6.8235×10^{-4}
b_3	405.32	b_7	3.1240×10^{-4}
b_4	-9.9290×10^{-2}	b_8	-8.3245×10^{-2}

APR1400 전노심 해석 결과 냉각재 온도 분포는 그림 3.13과 같다. 이는 수정된 횡방향 대류 인자를 적용한 지지격자-유도 횡류 모델을 사용한 계산 결과이다.

균일한 횡방향 대류 인자와 수정된 횡방향 대류 인자를 적용한 두 계산 모두 최소 DNBR이 23번 집합체에서 관측되었다. 23번 집합체의 위치는 그림 3.14와 같다.

그림 3.15는 23번 집합체에서 DNBR이 3 이하인 영역을 나타낸 것이다. 두 계산 모두 출력이 가장 큰 중앙 부분에서 최소 DNBR이 관측되었고, 최소 DNBR은 (가)에서 2.428, (나)에서 2.417로 계산되었다.

수정된 횡방향 대류 인자를 적용하였을 때 최소 DNBR의 크기는 약 0.5%정도 감소하였다. 횡방향 대류 인자를 0.27로 통일하였을 때보다 부수로 종류 별로 횡방향 대류 인자를 재정의하였을 때 혼합날개 모델에 의한 효과가 전체적으로 적게 작용하기 때문에 최소 DNBR의 값이 더 작게 계산됐다고 분석할 수 있다. 결론적으로 CFD 계산을 기반으로 한국부적인 횡방향 대류 인자의 수정이 APR1400 전노심 해석 결과에 영

향을 미침을 확인하였으며, 이는 안전해석 측면에서 혼합날개에 의한 횡방향 유동 모사의 중요성을 상기시킨다고 할 수 있다. 횡방향 대류 인자에 따른 전노심 해석 결과 비교는 표 3.4에 정리하였다.

표 3.4 횡방향 대류 인자에 따른 전노심 해석 결과 비교

횡방향 대류 인자	최소 DNBR 위치	최소 DNBR
균일	23번 집합체	2.428
수정	23번 집합체	2.417

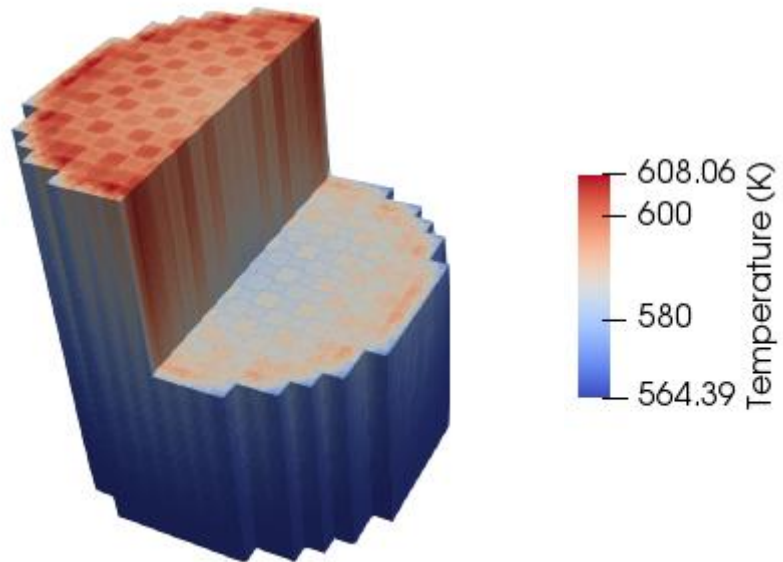


그림 3.13 APR1400 전노심 해석 결과

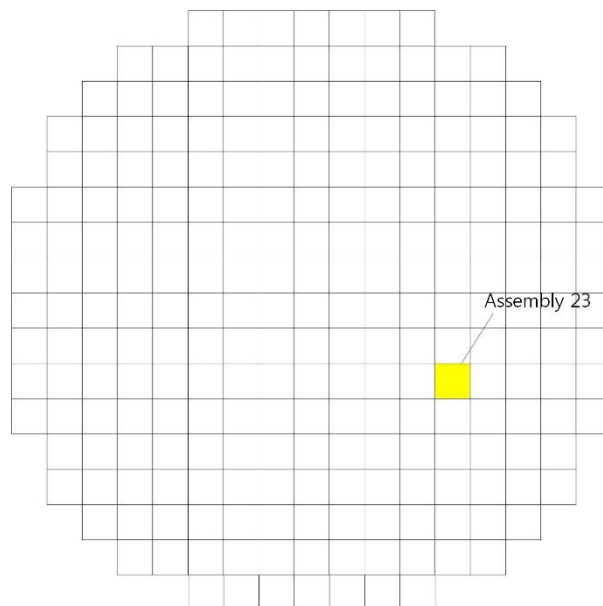


그림 3.14 APR1400 23 번 집합체 위치

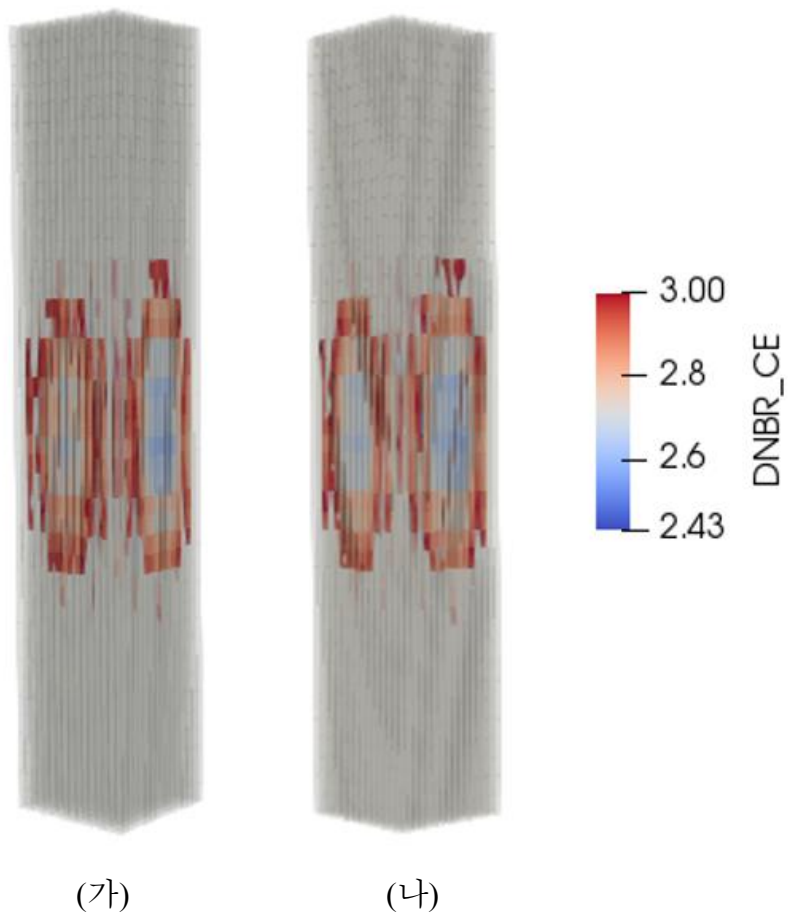


그림 3.15 APR1400 23 번 집합체의 DNBR 계산 결과

(가) 균일 횡방향 대류 인자 적용 (나) 수정 횡방향 대류 인자 적용

제 4 장 이상 유동 해석에서의 모델 적용

기존 CUPID에 적용된 지지격자-유도 횡류 모델은 단상유동 조건에서만 검증되었다 (김슬빈, 2018). 본 연구에서는 PSBT 기포율 측정 실험 검증을 통해 2상유동 계산에서 CUPID 코드의 지지격자-유도 횡류 모델의 성능을 평가하였다.

제 1 절 PSBT 기포율 측정 실험

앞서 언급한 바와 같이 PSBT 실험 벤치마크는 크게 두가지로 나뉘어져 있고, 본 장에서는 기포율 측정 실험에 대한 내용을 기술한다. PSBT 실험 장치는 그림 3.1과 같고 그림 4.1은 그림 3.1에서 기포율 측정부를 확대한 모습이다. 측정부는 가열부 최하단에서부터 2216 mm, 2669 mm, 3177 mm에 총 3개가 위치해있다. 기포율 측정은 ^{137}Cs 에서 생성되는 감마선을 이용하여 감마선 생성기 반대편에 위치한 탐지기에서 감마선의 밀도를 측정하여 이루어진다. 그림 4.1과 같이 감마선 생성기-탐지기로 구성된 측정은 x, y 방향에서 각각 이루어지며, 각 방향의 데이터를 이용하여 중앙 부수로 평균 기포율이 측정된다 (Rubin, 2012).

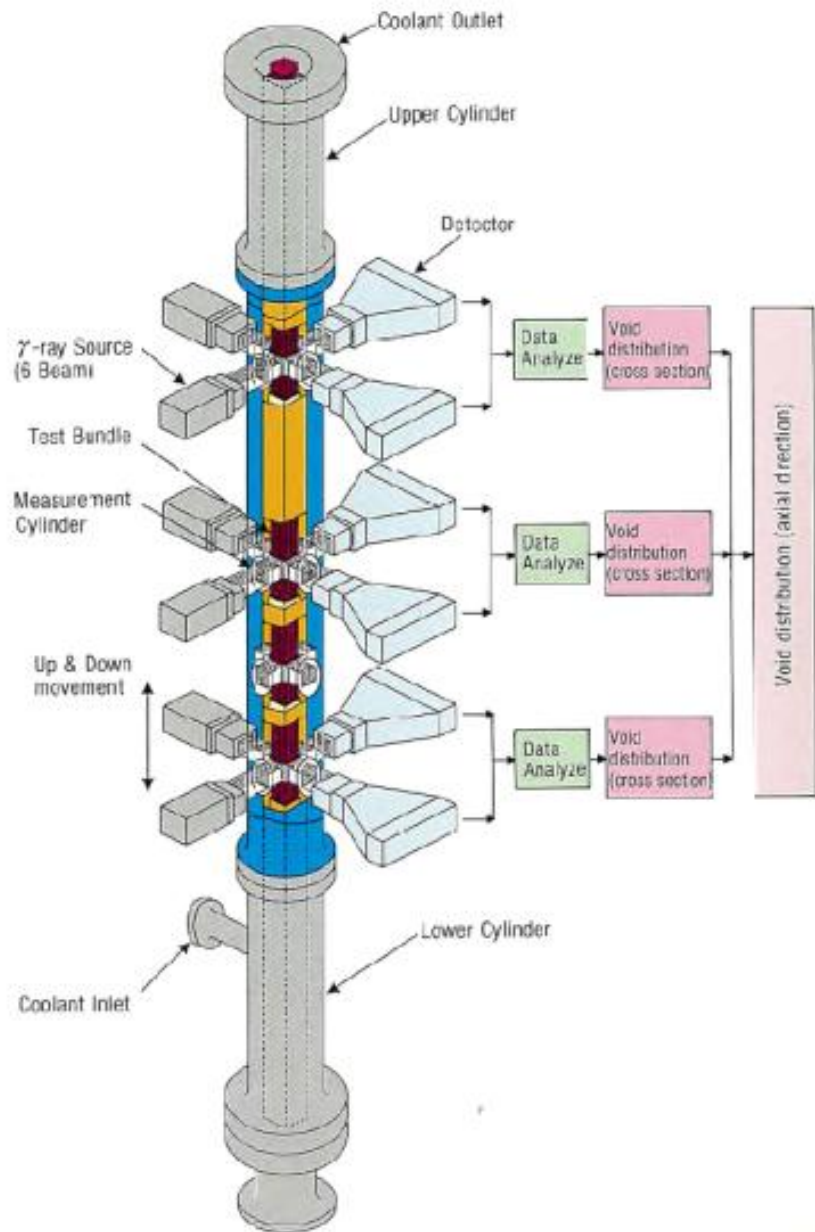


그림 4.1 PSBT 기포율 측정 실험장치의 측정부 (Rubin, 2012)

1. PSBT 기포율 측정 실험 케이스

본 연구에서 다루는 정상 상태 기포율 측정 실험은 5, 6, 7번 실험 시리즈이다. 총 34개의 실험 케이스에 대하여 검증을 진행했으며, 각 케이스들의 초기 온도, 압력, 유량과 3곳의 측정부에서 중앙 부수로의 평균 기포율 데이터가 제공되어 있다. 5번 시리즈는 축방향 출력 분포가 균일하고, 6번과 7번 시리즈는 축방향 출력 분포가 그림 4.2와 같은 코사인 형태이다. 또한 7번 시리즈의 경우 중앙에 외경 12.24 mm의 비가열봉이 존재한다. 각 실험 시리즈의 가열봉 별 출력 분포는 그림 4.3과 같고, 각 시리즈 별 초기 조건 차이를 표 4.1에 정리하였다.

표 4.1 PSBT 실험 시리즈별 비교

실험 시리즈	축방향 출력 분포	비가열봉 여부
5	균일	없음
6	코사인	없음
7	코사인	있음

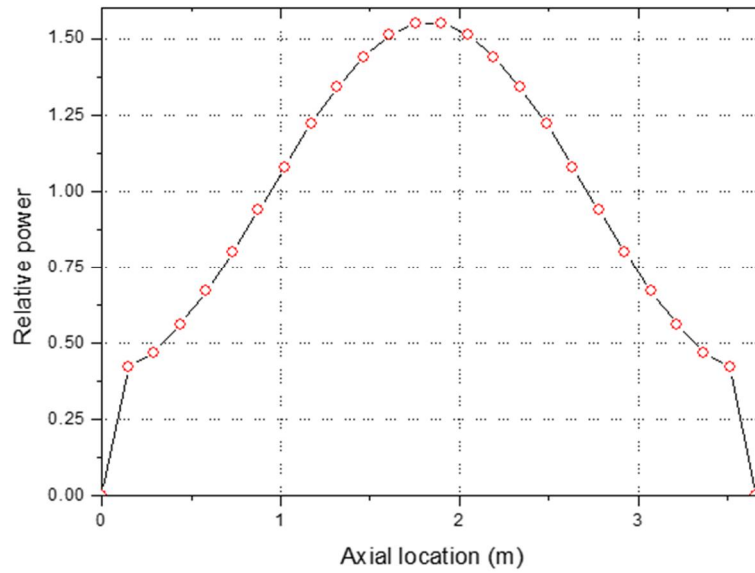


그림 4.2 PSBT 실험 코사인 축방향 출력 분포

0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85
0.85	1.00	1.00	1.00	0.85	0.85	1.00	1.00	1.00	0.85
0.85	1.00	1.00	1.00	0.85	0.85	1.00	0.00	1.00	0.85
0.85	1.00	1.00	1.00	0.85	0.85	1.00	1.00	1.00	0.85
0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85

(가)

(나)

그림 4.3 PSBT 실험 5, 6 번 시리즈의 가열봉 별 출력 분포 (가)와 7 번 시리즈의 가열봉 별 출력 분포 (나)

2. PSBT 기포율 측정 실험 검증 결과

검증은 지지격자-유도 횡류 모델을 적용하지 않았을 경우와 적용했을 경우로 나뉘어 진행하였다. 지지격자-유도 횡류 모델은 수정된 횡방향 대류 인자를 적용하였으며, 단상 액체 유동 양식 (single phase liquid flow regime)와 기포 유동 양식 (bubble flow regime)에 해당하는 부수로에 적용하였다.

그림 4.4는 검증을 진행한 실험 케이스 중 하나인 05-6321번 케이스에서 두 계산에서 출구 기포율 분포를 비교한 결과이다. 두 계산의 기포율 분포의 형태는 동일하고, 기포율의 크기가 지지격자-유도 횡류 모델을 적용하였을 때 전체적으로 0.1~0.2 가량 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 그림 4.5는 두 계산에서 기포율의 축방향 시점 분포를 비교한 결과이다. 붉은 점선은 기포율 0.01 지점을 나타낸 것으로, 혼합날개 모델을 적용하면 기포의 생성이 상대적으로 늦어지는 것을 알 수 있다. 따라서 혼합날개가 생성하는 횡방향 유동에 의해 벽면 열전달 성능이 증가하고, 같은 조건에서 전체적으로 비등이 적게 일어나고 기포율이 낮아지는 효과를 잘 모사했다고 할 수 있다.

그림 4.6과 그림 4.7은 PSBT 기포율 측정 실험의 검증 결과를 나타낸다. 그래프에 표시된 점선은 표준편차의 2배에 해당하는 선으로, 표준편차는 혼합날개 모델이 없을 때 0.1002, 혼합날개 모델을 적용했을 때 0.0844로 계산되었다. 두 계산 모두 기포율이 낮은 구간에서는 실험 결과를 과대 예측하였고 기포율이 높은 구간에서는 과소 예측하였다.

오차가 큰 케이스들을 보면 기포율이 높은 실험 케이스에서 하단 측

정부의 기포율을 크게 과대 예측하는 것을 알 수 있다. 이러한 결과를 바탕으로 기포가 발생하는 위치가 실제 실험보다 낮게 계산되었다는 것을 유추할 수 있다. 본 연구에서 진행한 PSBT 기포율 측정 실험 검증에는 단상 액체 유동 양식과 기포 유동 양식의 부수로에 대해서만 지지격자-유도 횡류 모델을 적용했기 때문에, 기포율이 높은 부수로에서도 지지격자-유도 횡류 모델을 적용하여 비등의 억제시키면 보다 나은 검증 결과를 얻을 수 있을 것으로 전망된다.

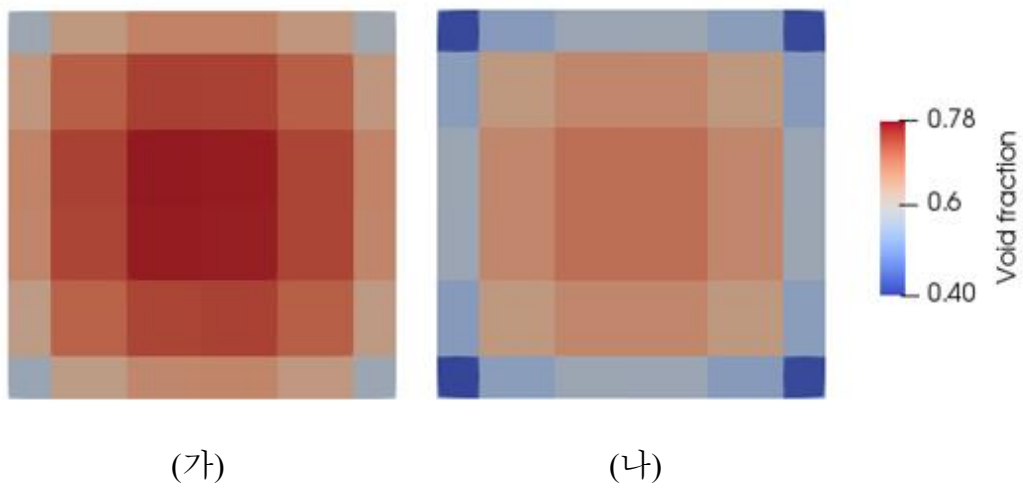


그림 4.4 PSBT 05-6321 번 실험의 혼합날개 모델을 적용하지 않은 계산 (가)과 혼합날개 모델을 적용한 계산 (나)의 출구 기포율 분포

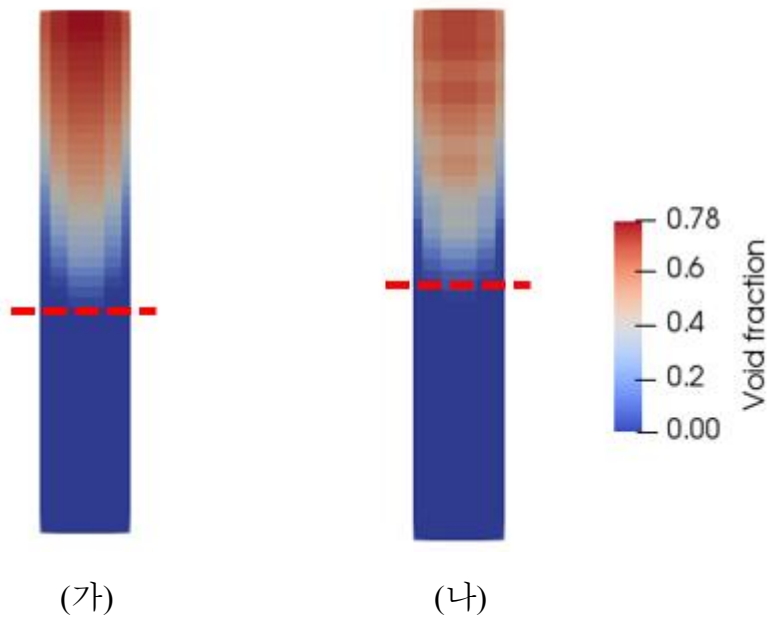


그림 4.5 PSBT 05-6321 번 실험의 혼합날개 모델을 적용하지 않은 계산 (가)과 혼합날개 모델을 적용한 계산 (나)의 축방향 시점 기포율 분포

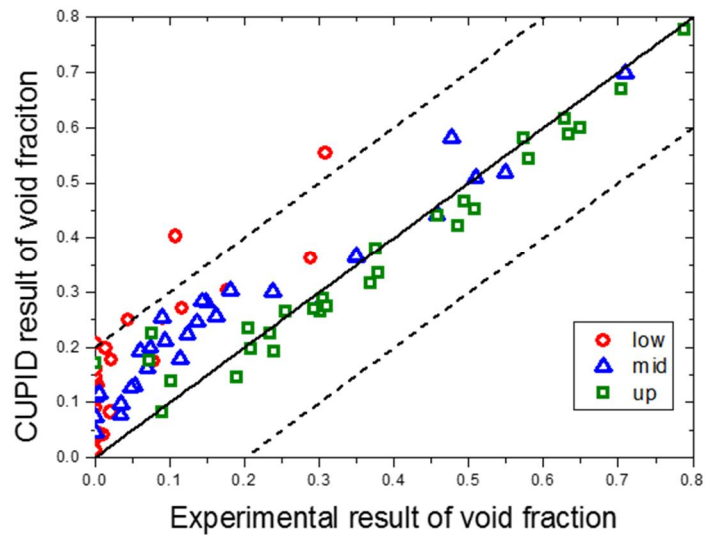


그림 4.6 혼합날개 모델을 적용하지 않은 CUPID 코드 계산의 PSBT 기포율 측정 실험 검증 결과

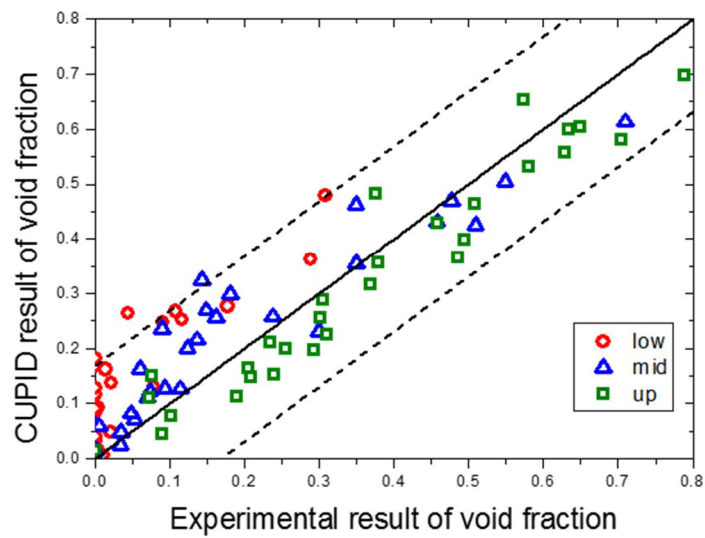


그림 4.7 혼합날개 모델을 적용한 CUPID 코드 계산의 PSBT 기포율 측정 실험 검증 결과

제 5 장 결 론

본 논문에서는 CUPID 부수로 단위 해석 성능 향상을 목적으로 지지격자-유도 횡류 모델을 개선하기 위한 연구를 수행하였다. 지지격자 혼합날개에 의해 발생하는 부수로 간 유동 혼합에 대한 MATiS-H 실험을 CFD 코드를 이용해 해석하였으며, 이를 통해 지지격자-유도 횡류 모델에서 사용되는 횡방향 대류 인자를 도출하였다. 부수로 별 유선을 분석하여 부수로 종류 별로 혼합날개에 의해 유도되는 횡방향 유동 특성이 다르다는 점을 관측하였다. 이를 바탕으로 기존의 MATiS-H 실험 형상과 더불어 CE형 핵연료 집합체 안내관이 포함된 형상을 해석하여 총 5가지 부수로 형상에 대하여 횡방향 대류 인자를 도출하였고, 기존의 지지격자-유도 횡류 모델과 달리 부수로 종류 별로 다른 값의 횡방향 대류 인자를 정의하였다.

수정된 횡방향 대류 인자를 적용한 CUPID 부수로 단위 해석을 이용하여 PSBT 열 혼합 실험 검증을 진행한 결과 기존의 균일 횡방향 대류 인자를 적용한 계산에 비해 실험 결과를 잘 예측한다는 것을 입증하였다. 또한 APR1400 단일 집합체 계산과 전노심 계산을 수행하여 수정된 횡방향 대류 인자가 노심 열수력 해석 측면에서 미치는 영향을 알아보았고, 수정된 횡방향 대류 인자를 이용한 계산에서 최소 DNBR 값이 더 작게 계산됨을 확인하였다.

CUPID 부수로 단위 해석에 적용된 지지격자-유도 횡류 모델을 2상 유동 계산에서 검증하기 위하여 PSBT 기포율 측정 실험을 모사하였다.

지지격자-유도 횡류 모델을 적용하지 않았을 경우에 비해 모델을 적용했을 때 전체적인 기포율 값이 감소하였고, 비등이 상대적으로 늦게 시작된다는 사실을 확인하였다. 실험 결과와의 비교를 통해 지지격자-유도 횡류 모델을 적용했을 때 실험 결과를 더 잘 예측할 수 있음을 확인하였다. 그러나, 2상유동 해석 시 지지격자-유도 횡류 모델을 단상 액체 및 기포유동 영역에 제한하였으며, 그 결과 높은 기포율이 발생하는 실험 조건에서는 실험 결과와의 차이가 개선되지 않았다.

CUPID 부수로 단위 해석을 이용한 2상유동 실험 검증 결과 높은 기포율 구간에서 상대적으로 큰 오차가 발생하였고, 이를 개선하기 위하여 향후 높은 기포율이 나타나는 부수로의 혼합날개 모델 적용을 위한 연구가 요구된다. 특히 2상유동 조건에서의 각 유동 양식에 따른 혼합날개에 의한 횡방향 유동에 관한 분석이 요구된다. 또한 혼합날개에 의한 기포 유동의 특성과 기포 생성 조건의 특징을 분석하여 부수로 코드의 혼합날개 모델을 제시하면 부수로 단위 해석을 이용한 혼합날개에 의한 횡방향 유동 모사가 보다 개선될 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

김슬빈, CUPID 부수로 해석능력 향상을 위한 지지격자-유도 횡류 모델 및 핵연료봉 열전도 모델 개선, *서울대학교*, 2018

Salko, Robert K., and Avramova, M., "COBRA-TF Subchannel Thermal-Hydraulics Code (CTF) Theory Manual–Revision 0." Consortium for Advanced Simulation of Light Water Reactors, CASL-U-2015-0054, *Oak Ridge National Laboratory (ORNL)*, 2015.

Blyth, T. S., Development and Implementation of CFD-Informed Models for the Advanced Subchannel Code CTF, *Pennsylvania State University*, 2017.

Avramova, M., T. S. Blyth, & Robert K. Salko. CTF User's Manual. No. ORNL/TM--2016/431. *Oak Ridge National Laboratory (ORNL)*, 2016.

Lee, J. R., Kim J. W., Song C.H., “Synthesis of the turbulent mixing in a rod bundle with vaned spacer grids on the OECD-KAERI CFD benchmark exercise”, *Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI)*, 2014

Rubin, A., Schoedel, A., Avramova, M., Utsuno, H., Bajorek, S., & Velazquez-Lozada A., OECD/NRC Benchmark based on NUPEC PWR subchannel and bundle tests (PSBT), Volume I: Experimental Database and Final Problem Specifications, *US NRC OECD Nuclear Energy Agency*, 2010.

Siying Dong et al., Application of the improved spacer grid model in subchannel analysis code, *Nuclear Technology*, 2018

Jung Y. S., Shim C. B., Lim C. H., Joo H. G., “Practical numerical reactor employing direct whole core neutron transport and subchannel thermal/hydraulic solvers”, *Annals of Nuclear Energy*, 2013

C-E Report, C-E Critical Heat Flux Correlation for C-E Fuel Assemblies with Standard Spacer Grids, Part II, Non-Uniform Axial Power Distribution, CENPD-207, *Combustion Engineering Co., Winsor, CT.*, 1976

Abstract

Improvement of Grid-directed Cross Flow in CUPID Subchannel Scale Analysis Module based on CFD Calculation

Jae-Ho Lee

Department of Nuclear Engineering

The Graduate School

Seoul National University

Mixing vane is a structure applied in rod bundle geometry, which enhances the coolability of nuclear fuel rods. In thermal-hydraulic analysis field, one of the essential issue is simulating the lateral flow due to mixing vane and spacer grid geometry. Grid-directed cross flow model is the model simulates lateral flow due to mixing vane in subchannel scale analysis code, CTF. This model is implemented in CUPID subchannel scale analysis in previous study.

There was lack of physical basis for defining the lateral convection factor, which is the factor represents the intensity of lateral flow in CUPID subchannel scale analysis. Also in order to justify defining lateral convection factor equally

for all subchannels, CFD analysis of MATiS-H experiment was used for calculating lateral convection factor. Lateral convection factor was various for each type of subchannels. Subchannels near the CE-type guide tube geometry were also considered for calculation of lateral convection factor.

PSBT thermal mixing test was simulated for validation of modified lateral convection factor in CUPID code. Compared with the calculation that used uniform lateral convection factor like previous model, the new calculation result with modified lateral convection factor predicted well the PSBT thermal mixing test. Especially it predicts the location of the subchannel which had the highest temperature.

APR1400 whole core simulation with modified lateral convection factor was compared with previous calculation. Power distribution from calculation result of nTRACER code was used. Calculations of 8th subchannel with modified and uniform lateral convection factor was compared, and whole core calculations were also compared. Minimum DNBR from modified lateral convection factor was 0.5% less than minimum DNBR from uniform lateral convection factor.

In previous study, grid-directed cross flow model was only implemented in single phase calculation. PSBT void measurement test was validated for justify the grid directed cross flow model from CUPID code in two phase simulation. Grid-directed cross flow model was implemented only in the subchannels in single phase liquid flow regime or bubble flow regime. Implementing the grid-directed cross flow model decreased the void fraction and set back boiling. Calculation result with grid-directed cross flow model well predicted the PSBT void measurement test than the calculation without mixing vane model. There were over predictions at test cases include high void fraction result. Therefore,

implementation of grid-directed cross flow model in subchannels with high void fraction is needed. Also, experimental data about the bubbly flow near the mixing vane geometry was suggested for the model for simulating two phase flow near mixing vane in subchannel scale analysis.

.....

Keywords: Subchannel scale T/H analysis, Mixing vane, Grid-directed cross flow model, CUPID, CFD analysis

Student Number: 2017-20682